

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Broadband over Visible Light: vzestupná komunikace

Broadband over Visible Light: Uplink Communication

2017

Bc. Tomáš Václavík

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Tomáš Václavík

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Broadband over Visible Light: vzestupná komunikace
Broadband over Visible Light: Uplink Communication

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Technologii Broadband over Visible Light můžeme zařadit do skupiny optických bezvláknových komunikačních systémů provozovaných ve viditelném spektru. Aktuálním předmětem výzkumu je návrh vhodné koncepce vzestupné části komunikace pro vytvoření výsledného duplexního systému. Cílem absolventské práce bude návrh koncepce a ověření vzestupné části komunikačního systému v oblasti IR spektra (850 nm) a v oblasti RF spektra (Bluetooth 4.0 a vyšší).

- 1) Popis technologie Broadband over Visible Light.
- 2) Návrh řešení IR vzestupné komunikace v oblasti IR spektra (850 nm).
- 3) Návrh řešení IR vzestupné komunikace v oblasti RF spektra (Bluetooth 4.0 a vyšší).
- 4) Realizace obou variant v prostředí LabVIEW a jejich zprovoznění prostřednictvím softwarově definovaného rádia (PXI, USRP).
- 5) Provedení sady ověřovacích reálných měření (BER versus SNR, BER versus vzdálenost).

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Anatoly, J. a N. Theethayi. *Broadband Power-line Communication Systems: Theory and Applications*. Southampton: WIT Press, 2010. ISBN 978-1-84564-416-1.
- [2] Shieh, W. and I. Djordjevic. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Optical Communications*. London: Elsevier, 2010. ISBN 978-0-12-374879-9.

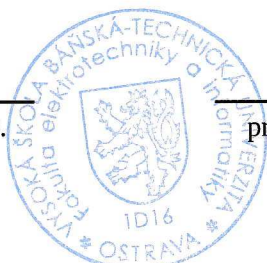
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Koudelka, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28. dubna 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Koudelkovi, PhD. za odbornou pomoc a konzultace při návrhu této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům za velikou podporu při studiu.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou bezdrátového datové přenosu v oblasti IR a RF spektra. Aktuálním předmětem výzkumu je návrh vhodné koncepce vzestupné části komunikace pro vytvoření duplexního systému. Cílem práce je návrh koncepce a ověření vzestupné části komunikačního systému v IR a RF oblasti. Výsledky pocházejí z měření v softwaru LabVIEW. Pro hardwarovou část byl využit USRP 2921 vektorový signálový generátor a USRP 2921 vektorový signálový analyzátor. V práci porovnám jednotlivé modulační technologie – porovnání bitové chybovosti BER versus odstupu signálu od šumu E_b/N_0 a dále závislosti bitové chybovosti BER na vzdálenosti.

Klíčová slova

BER, SNR, USRP, 8-DPSK, $\pi/4$ DQPSK, 16-QAM, EVM, MER

Abstract

The thesis deals with problems of wireless data transmission in the field of IR and RF spectra. The current subject of the research is to create a conception of the upstream part of the communication to create the duplex system. The aim of the thesis is to create a concept and verify the upstream part of the communication system in the field of IR and RF. The results come from measurements in LabVIEW software. For the hardware part, the USRP 2921 vector signal generator and the USRP 2921 vector signal analyzer were used. At work, I want to compare the individual modulation technologies according to the BER (Bit Error Rate) versus E_b / N_0 and the BER over distance.

Key words

BER, SNR, USRP, 8-DPSK, $\pi/4$ DQPSK, 16-QAM, EVM, MER

Seznam ilustrací a seznam tabulek

- Obr. 1.1: *Využití technologie v automobilové dopravě.*
- Obr. 1.2 *Varianty optické bezvláknové datové sítě*
- Obr. 2.1: *Konstelační diagram modulace QPSK*
- Obr. 2.2: *Konstelační diagram modulace 8-PSK*
- Obr. 2.3: *konstelační diagram modulace 16-QAM*
- Obr. 3.1: *Základní specifikace Bluetooth*
- Obr. 3.2: *Referenční model (protokoly)*
- Obr. 3.3: *Princip frekvenčních skoků*
- Obr. 3.4: *Pikosítě (tzv. piconet) a rozptýlená síť (tzv. scatternet)*
- Obr. 3.5: *Struktura Bluetooth paketu*
- Obr. 3.6: *Struktura přenosu dat komunikace typu "point-to-point"*
- Obr. 3.7: *Bluetooth víceslotové pakety*
- Obr. 3.8: *Jednoslotové pakety*
- Obr. 3.9: *Bluetooth profily*
- Obr. 3.10: *Struktura zabezpečení Bluetooth přenosu dat*
- Obr. 5.1: *Shannonův a Weaverův model komunikačního kanálu*
- Obr. 5.2: *Zobrazení rozložení pravděpodobnosti amplitud*
- Obr. 5.3: *Hustota pravděpodobnosti amplitud*
- Obr. 6.1: *Blokový diagram modulátoru PSK*
- Obr. 6.2: *Grafické rozhraní modulátoru v softwaru LabVIEW 2016*
- Obr. 6.3: *Grafické rozhraní demodulátoru v softwaru LabVIEW 2016*
- Obr. 6.4: *Blokový diagram demodulátoru 8-DPSK (1/2)*
- Obr. 6.5: *Blokový diagram demodulátoru 8-DPSK (2/2)*
- Obr. 6.6: *BER versus E_b/N_0*
- Obr. 6.7: *BER versus vzdálenost*
- Obr. 6.8: *BER versus E_b/N_0*
- Obr. 6.9: *E_b/N_0 8, 12, 16, 24 dB*
- Obr. 6.10: *BER versus vzdálenost*
- Obr. 7.1: *Model komunikačního kanálu*
- Obr. 7.2: *Závislost EVM versus vzdálenost*
- Obr. 7.3: *Závislost EVM versus výstupní výkon*

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Obr. 8.1: *Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 8$ dB*

Obr. 8.2: *Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 12$ dB*

Obr. 8.3: *Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 16$ dB*

Obr. 8.4: *Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 24$ dB*

Obr. 8.5: *Simulace 8-DPSK - BER versus E_b/N_0*

Obr. 8.6: *Simulace 8-DPSK - BER versus vzdálenost*

Obr. 8.7: *Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 8$ dB*

Obr. 8.8: *Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 12$ dB*

Obr. 8.9: *Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 16$ dB*

Obr. 8.10: *Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 20$ dB*

Obr. 8.11: *Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 24$ dB*

Obr. 8.12: *Tx $\pi/4$ DQPSK*

Obr. 8.13: *Simulace $\pi/4$ DQPSK - BER versus E_b/N_0*

Obr. 8.14: *Simulace $\pi/4$ DQPSK - BER versus vzdálenost*

Obr. 8.15: *Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 8$ dB*

Obr. 8.16: *Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 12$ dB*

Obr. 8.17: *Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 16$ dB*

Obr. 8.18: *Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 20$ dB*

Obr. 8.19: *Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 24$ dB*

Obr. 8.20: *Tx 16-QAM*

Obr. 8.21: *Simulace 16-QAM - BER versus E_b/N_0*

Obr. 8.22: *Simulace 16-QAM - BER versus vzdálenost*

Tab. 1.1: *Porovnání různých komunikačních technologií VLC, IR a RF*

Tab. 2.1: *Porovnání M-QAM modulací*

Tab. 2.2: *Počet přenesených bitů jedním stavem u M-PSK modulace*

Tab. 3.1: *Třídy zařízení Bluetooth*

Tab. 3.2: *Maximálních teoretických přenosových rychlostí*

Seznam symbolů a zkratek

λ	vlnová délka
A	zisk
ASK	klíčování amplitudovým posuvem
BER	bitová chybovost
BPSK	binární dvoustavová fázová modulace
CP	cyklický prefix
DFT	diskrétní Fourierova transformace
DPSK	diferenciální fázová modulace
DQPSK	diferenciální kvadrurní fázová modulace
E_b/N_0	odstup signálu od šumu
EVM	amplituda chybového vektoru
FEC	dopředná korekce chyb
FFT	rychlá Fourierova transformace
FSK	klíčování frekvenčním posuvem
I	proud
ICI	interference mezi nosnými
IR	infračervená komunikace
LED	dioda emitující světlo
MER	modulační chybovost
M-PSK	vícestavová fázová modulace
OFDM	ortogonální frekvenčně dělený multiplex
P	výkon
PSK	klíčování fázovým posuvem
QAM	kvadrurní amplitudová modulace
RF	rádio-frekvenční komunikace
SNR	odstup signálu od šumu
VLC	komunikace ve viditelném světle

OBSAH

ÚVOD	3
1 STANDARD IEEE 802.15.7	4
1.1 Porovnání komunikačních technologií	6
1.2 Architektura modelu ISO/OSI	7
1.3 Topologie sítě	8
1.4 Historie	8
2 MODULACE SIGNÁLU	10
2.1 Modulační rychlost	10
2.2 Přenosová rychlost	10
2.3 Šířka pásma	11
2.4 Konstelační diagram	11
2.5 BER	12
2.6 SNR	12
2.7 Digitální modulace	13
2.7.1 Dvoustavové digitální modulace	13
2.7.2 Vícestavové digitální modulace	14
3 STANDARD IEEE 802.15.1	16
3.1 Bezdrátové osobní sítě (WPAN)	16
3.2 Specifikace rádiového rozhraní	17
3.3 Specifikace jednotlivých verzí	17
3.4 Struktura paketu	22
3.5 Protokoly jednotlivých vrstev	24
3.6 Bluetooth profily	26
3.7 Bezpečnost technologie	26
4 ZÁKLADNÍ TYPY POUŽÍVANÝCH ANTÉN	28
4.1 Rozdělení antén	29
5 ANALÝZA CHYBOVOSTI	31
5.1 Model komunikačního kanálu	31
5.2 Definice bitové chybovosti	32
5.3 Regenerace signálu	32
5.4 Rozložení amplitudy symbolů	33
5.5 Pravděpodobnost vzniku chyby	34
5.6 Pravděpodobnost vzniku chyby pro víceúrovňové kódy	35

6	NÁVRH ŘEŠENÍ VZESTUPNÉ RF KOMUNIKACE	36
6.1	Modulátor signálu PSK	36
6.2	Demodulátor signálu PSK	38
6.3	Měření 8-DPSK	41
6.4	Měření $\pi/4$ DQPSK	43
7	NÁVRH ŘEŠENÍ VZESTUPNÉ IR KOMUNIKACE	46
7.1	Modulace a demodulace	46
7.2	Měření	47
	ZÁVĚR.....	49
I.	SADA OVĚŘOVACÍCH SIMULAČNÍCH MĚŘENÍ	50
I.I	8-DPSK	50
I.II	$\pi/4$ DQPSK	52
I.III	16-QAM	54
II.	POUŽITÁ LITERATURA	57
III.	SEZNAM PŘÍLOH	58

ÚVOD

Komunikace v dnešním světě představují nezbytnou součást moderní společnosti. Bezdrátové komunikace tvoří převážnou většinu lokálních sítí (*LAN*). Rádiové komunikace jsou bezesporu velmi spolehlivé, avšak podléhají také mnoha faktorům a normám. Rádio frekvenční (*RF*) pásmo je do desítek GHz přeplněno. Hlavní výhodou bezdrátových optických komunikací je její nevázanost na normy. Visible Light Communication (*VLC*) nám nabízí dvojí funkcionalitu. Lze jej využít jednak k osvětlení, ale také k zajištění komunikace. Optická bezdrátová komunikace se stala vhodným kandidátem pro doplnění *RF* komunikace zejména pro vnitřní bezdrátové aplikace na krátkou vzdálenost. Tato diplomová práce je zaměřena na popis technologie Broadband over Visible Light, návrh řešení *IR* vzestupné komunikace v oblasti *IR* spektra (850 nm), návrh řešení *IR* vzestupné komunikace v oblasti *RF* spektra (*Bluetooth*). Hlavní část práce je věnována realizaci obou variant v prostředí LabVIEW a jejich zprovoznění prostřednictvím softwarově definovaného rádia (*PXI, USRP*). Na závěr je provedena sada ověřovacích reálných měření (*BER versus SNR, BER versus vzdálenost*).

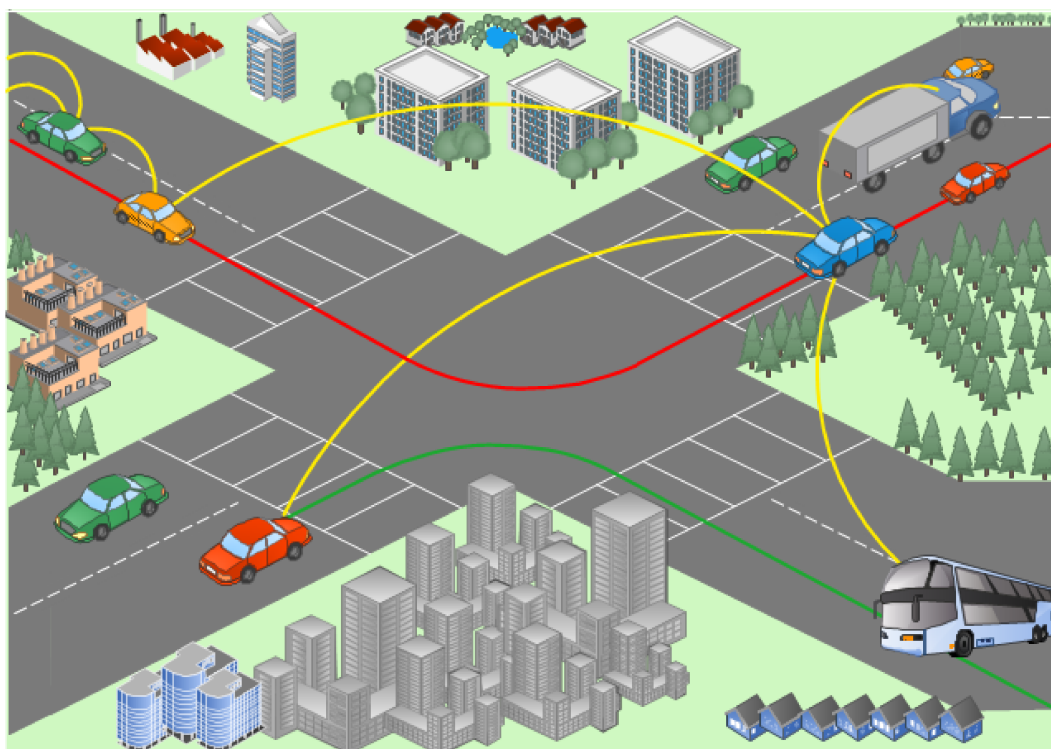
Bezdrátové datové optické komunikace jsou nejrychleji rostoucím segmentem v oblasti komunikací. Roste touha po vyšších přenosových rychlostech v bezdrátové přístupové síti. K dnešnímu dni bezdrátová technologie nabízí již tyto služby, nicméně vzhledem k omezené šířce pásma a zvyšujícímu se provozu rádiového spektra je síť stále přetížená. VLC poskytuje nákladově efektivní a flexibilní přístup k internetu. Optické bezdrátové komunikace je v první řadě třeba využít pro osvětlení a zajištění komunikace pro vnitřní a vnější prostory a aplikace v automobilovém průmyslu. Zde se může využít potenciál této zajímavé technologie. VLC můžeme zařadit do skupiny optických bezvláknových komunikačních systémů provozovaných ve viditelném spektru. Využít jej můžeme jako médium krátkého komunikačního dosahu s možností vysokorychlostního přenosu dat.

Technologie je atraktivním doplňkem rádiové přenosu. VLC může být použito v noteboocích, chytrých telefonech nebo automobilech. Aplikace se může osvědčit také pro osvětlení v nemocnicích, ve školách, v úřadech, aplikace v domácích alarmech nebo jiných bezpečnostních aplikacích. Technologii je možné využít také v automobilovém průmyslu. Senzory brzdových světlech mohou komunikovat s autem jedoucím za ním. V případě prudkého sešlápnutí brzdového pedálu můžeme zavčas předejít kolizi. Aplikace operují v bezlicenčním *ISM* pásmu. Máme možnost použití stejného zdroje vysílání pro osvětlení, signalizaci nebo zobrazovací techniku. Jedná se o výjimečnou technologii k dosažení vize ultra-širokopásmové domácí sítě bez nutnosti nové elektroinstalace. Technologie se hodí převážně do měst, kde by mohla nahradit stávající osvětlení u nemocnic, úřadů, škol a jiných institucí. V poslední době se technologie stala velmi atraktivním tématem pro vnitřní polohovací systémy a řešení v oblasti hraček, kdy náklady pro vývoj jsou velmi nízké. Technologie může být také použita k zajištění bezpečnosti při hlídání objektů. VLC může být využito jako komunikační médium pro *IoT* (*Internet of Things*) – koncept softwarového inženýrství, který kombinuje desktopové využití počítačů, tabletů, mobilů a terminálů k vytvoření sítě produktů, které budou připojeny k internetu a budou mezi sebou komunikovat v reálném čase. V posledních letech optické bezdrátové komunikace zažívají rostoucí zájem mezi uživateli. V současné době se Siemens Corporate Technology (*CT*) podílí na výstavbě domácí gigabitové sítě (*OMEGA*).

1 STANDARD IEEE 802.15.7

VLC (*Visible Light Communication*) můžeme zařadit do skupiny optických bezvláknových komunikačních systémů provozovaných ve viditelném světle. Pro komunikaci využíváme LED modulů. Zdroje LED záření disponují mnohými výhodami oproti klasickým zdrojům. Jejich použití je bezpečné a efektivní. Klasické zdroje záření (*vláknové žárovky, výbojky*) se celosvětově nahrazují moderními LED zdroji a fluorescentními zářivkami. Ve většině případů nahrazují klasické vláknové wolframové žárovky a halogenové či vysokotlaké výbojky v pouličním osvětlení. Pro komunikaci ve viditelném světle je nejvýhodnější využít právě LED zdroje záření. LED moduly jsou malých rozměrů, nízké hmotnosti, velké životnosti a nabízejí také nízkou spotřebou elektrické energie.

LED zdroje jsou primárně určeny k osvětlení. Jejich sekundární účel je poskytnout vysokorychlostní širokopásmovou komunikaci. Spotřeba elektrické energie při přenosu dat je minimální. Díky dvojí funkcionalitě (*osvětlení / přenos dat*), může být vytvořena řada zajímavých aplikací. Pro příklad můžeme uvést osvětlení s vysokorychlostním připojením k internetu na veřejně dostupných místech, nebo při komunikaci mezi automobily a dopravním značením apod. Širokopásmovou komunikaci ve viditelném světle můžeme využít i v místech, kde za normálního provozu dochází k rušení RF spektra. Použít jej můžeme také v objektech, které kladou důraz na bezpečnost (pomocí technologie dokážeme pokrýt signálem pouze určenou oblast). Uživatelé mohou bezpečně omezit pokrytí signálu pouze na oblast určenou oblast (*osvětlení*). Můžeme to vnímat jako výhodu při použití, které kladou důraz na bezpečnost, ale také jako nevýhodu – oblast je pokryta signálem pouze pod osvětlenou plochou.



Obr. 1.1: Využití technologie v automobilové dopravě.

LED zdroje se skvěle hodí pro komunikační účely, právě díky možnosti přesné modulace, která u klasických žárovek není možná. Ideálním osvětlením pro venkovní i vnitřní prostory je bílá LED. Bílé světlo můžeme generovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je kombinace všech tří základních barev RGB (*Red, Green, Blue*) – vyzářením červené, zelené a modré barvy současně vytváříme bílé světlo. Druhým způsobem je využití modré LED diody a luminoforu, který přeměňuje modré světlo na bílé. Detailní popis této problematiky naleznete v kapitole zaměřené na zdroje záření.

Pro dosažení vyšších přenosových rychlostí u bílých LED diod, narážíme na problematiku technického i netechnického původu. Jeden z těchto problémů, které musíme vyřešit je ten, aby zdroj LED záření poskytoval vysokou svítivost, dobré podání kvality barev a na závěr i nízkou pořizovací cenu. V následujících bodech jsem vytknul nejdůležitější vlastnosti. Využíváme LED diody v automobilech, vlacích, semaforech. Novější typ těchto diod emitujících světlo nahrazují již tradiční, ale zastaralé typy klasických žárovek v domácnostech a kancelářích. Tyto nové LED diody nahrazují staré řešení a šetří hlavně náš rozpočet. Provozování LED osvětlení je ekologicky méně náročné než provoz starších vláknových žárovek. Nejedná se pouze o úsporu elektrického proudu. Další výhodou pozorujeme i v možnostech modulace a nízké pořizovací ceně. Další výhodou je vysoká svítivost a možnosti komunikace ve viditelném spektru.

- Viditelnost světelného paprsku – uživatelé mohou bezpečně omezit pokrytí signálu tím, že omezí rozsah působení světelného toku. Paprsek jednoduše omezíme. Místa, která nejsou pokrytá světelným zářením, také nejsou pokryta signálem. V tom můžeme spatřit další velkou výhodu použití, jelikož signál můžeme jednoduše omezit a zdůraznit tak bezpečnost technologie. V místech bez dosahu nelze jednoduše signál odposlouchávat, jak tomu může být v případě rádiového řešení.
- Neexistence interference s jinými signály. Záření ve viditelném spektru nijak neinterferuje s jinými zdroji RF záření. Záření ve viditelném spektru neproniká přes překážky, a tudíž jsme chráněni před únikem signálu.
- Netrpí elektromagnetickým rušením – signál nám nabízí velmi široké neregulované pásmo mezi 400 THz (780 nm) a 800 THz (375 nm).
- Řešení je vhodné pro nemocnice i jiné organizace z důvodu zdravotní nezávadnosti záření, nehrozí žádné zdravotní problémy, technologie je vhodná i pro účely lékařského využití. Operujeme s velmi nízkými vyzařovacími úrovněmi, které nesmí poškodit zrak ani pokožku při neopatrné manipulaci se zdroji záření.
- Nehrozí způsobení požáru, můžeme aplikovat i v místech (v *prostředí*) s těkavými látkami a plyny.
- Pokročilé možnosti modulace signálu. Lidské oko není schopné rozlišit změny stavu ON a OFF (*tisíce sepnutí mezi stavem ON a OFF za sekundu*).

Z výše uvedených důvodů se VLC jeví jako velmi perspektivní technologie pro nasazení v nemocnicích, školách a také ve veřejném osvětlení. V Ostravě vzniká projekt Broadbandlight, který se zabývá právě aplikací této technologie pro osvětlení parkovišť a veřejných prostorů s pokrytím širokopásmové bezdrátové datové komunikace – vize osvětlení, komunikace a bezpečnost v jednom řešení. Technologie jistě uspokojují uživatele malých LAN sítí. Zároveň ale představuje slibnou technologii k doplnění rádiové komunikace. Tato zařízení umožňují využití vlnového multiplexu (WDM). Využíváme bílé LED diody. Ty jsou vytvořeny buď kombinací R, G, B (*Red, Green, Blue*), nebo za pomoci luminoforů. Princip je založen na modré LED diodě, která je potažena vrstvou fosforu, která emituje žluté světlo. Tato vrstva fosforu dokáže absorbovat část vlnových délek světla z modré LED diody.

Nevýhoda této technologie je poměrně malá využitelná šířka pásma. Je to proto, že fosfor reaguje pomaleji a omezuje šířku pásma je na několik MHz. Modré světlo může být získáno extrakcí pomocí filtru na přijímací straně. Pro dosažené vysoké přenosové rychlosti, která je omezena šířkou pásma, se využívá následujících metod:

- Odfiltrování optického záření od vlivu luminoforu, který vykazuje pomalou odezvu.
- Preekvalizace LED na vysílací straně.
- Postekvalizace LED na přijímací straně.
- Kombinace těchto tří technik.
- Použití složitějších modulačních formátů s přenosem víc bitů každým symbolem.

Využití technologie:

- Využití LED diod v automobilech, v signalizacích, v zobrazovací a osvětlovací technice.
- Náhrada klasických vláknových žárovek s možností vysokorychlostního přenosu dat.
- Znatelná úspora elektrické energie.
- Vyšší efektivita svítivosti než při klasických žárovkách. LED jsou energeticky účinné.
- Pokročilé možnosti modulace signálu.
- Technologie je nezávislá na elektromagnetickém rušení.
- Technologie operuje v bezlicenčním ISM pásmu.
- Pokročilé možnosti zabezpečení. Nemožnost odposlechu přes zeď. Výborné pro využití v místech, která kladou důraz na bezpečnost.

1.1 Porovnání komunikačních technologií

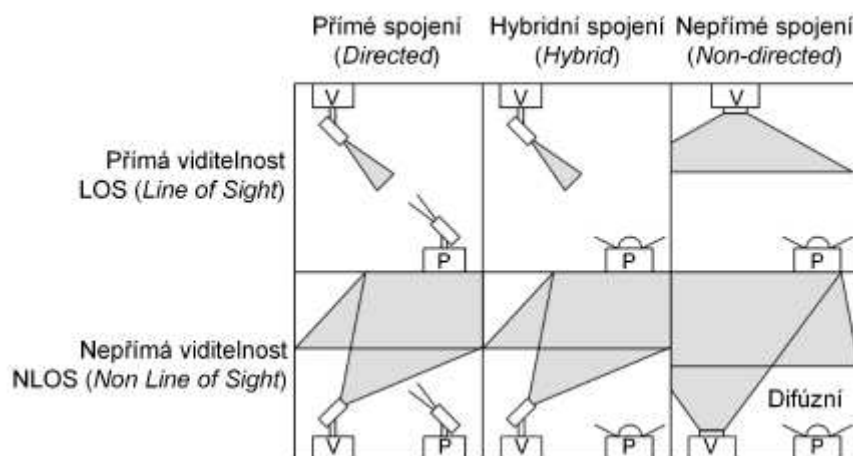
Jestliže máme porovnat různé komunikační technologie, musíme se zaměřit na několik podstatných faktorů charakterizující tyto technologie. Důležitým parametrem bezdrátových komunikací je přenosová rychlost systému. Přenos dat technologií Bluetooth jsme schopni dosáhnout přenosové rychlosti kolem 1–6 Mbit/s dle šířky použitého pásma. V kombinaci s Wi-Fi i více. VLC technologie přenosu dat přes viditelné spektrum může dosahovat přenosových rychlostí přes 1000 Mbps. V tabulce jsem uvedl další parametry pro srovnání.

Tab. 1.1: Porovnání různých komunikačních technologií VLC, IR a RF

Vlastnosti	VLC	IR	RF
Šířka pásma	800 THz – 430 THz (390 nm – 760 nm)	430 THz – 300 GHz (760 nm – 1 mm)	300 GHz – 3 kHz (1 mm – 10 ⁵ km)
El. mag. interference	Ne	Ne	Ano
Přímá viditelnost	Ano	Ano	Ne
Dosah	Krátký	Krátký	Dlouhý
Bezpečnost	Velmi dobrá	Dobrá	Dobrá
Služby	Osvětlení, dat. komunikace	Dat. komunikace	Dat. komunikace
Zdroje šumu	Okolní světlo	Okolní světlo	El. mag. zařízení
Spotřeba el. energie	Nízká	Nízká	Nízká

V roce 2009 byla založena výzkumná skupina zabývající se bezdrátovou komunikací využívající viditelné světlo na krátké vzdálenosti. Roku 2011 byl definován první standard fyzické vrstvy a MAC vrstvy. Standard udává přenosovou rychlost pro přenos audio a video služeb a zabývá se také šumem a interferencí okolního světla.

Dále předepisuje bezpečnostní předpisy pro zdroje záření. Hlavním účelem bylo vytvořit světový bezpečnostní standard pro krátké bezdrátové optické komunikace využívající nelicencované pásmo. Dalším důvodem vydání standardu 802.15.7 bylo zajištění zpětné kompatibility s jinými zařízeními.



Obr. 1.2 Varianty optické bezvláknové datové sítě

Optické bezvláknové datové sítě pro vnitřní prostory jsou klasifikovány do několika variant. Mezi první variantu patří přímá viditelnost mezi vysílačem a přijímačem. Optické bezvláknové systémy s přímou viditelností se označují jako LOS (*Line of Sight*) a bez přímé viditelnosti jako NLOS (*Non Line of Sight*). NLOS varianta spoléhá na odrazy od elementů v prostoru (*zdi nebo jiné prvky*), proto jsou systémy koncipované jako difúzní (*zaručují vysokou funkčnost s ohledem na procházející osoby v daném prostoru či jiné překážky*). Nevýhodou je snížení přenosové kapacity vlivem komplikovaného šíření signálu mezi vysílačem a přijímačem. Druhá varianta se označuje jako LOS. Přímé spojení vyžaduje směrovost vysílače a přijímače za účelem vytvoření komunikačního spojení. Nepřímé spojení využívá širokoúhlé vysílače a přijímače, což zmírňuje problematiku vzájemného polohování. Přímé spojení maximalizuje energetickou účinnost. Jsou minimalizovány ztráty vlivem příjmu šumu a okolního parazitního optického záření. Avšak mezi nejdůležitější parametry patří zajištění mobility koncovým účastníkům. V takovém případě je daleko výhodnější využít nepřímého spojení. Alternativou je hybridní spojení, které kombinuje vysílače a přijímače s různým stupněm směrovosti.

1.2 Architektura modelu ISO/OSI

Architekturu definujeme pomocí vrstev a podvrstev. Cílem tohoto dělení je celkové zjednodušení a rozložení problematiky do jednotlivých dílčích vrstev. Vrstva nižší poskytuje služby vrstvě vyšší. Standard definuje fyzickou vrstvu i MAC vrstvu (*podvrstva linkové vrstvy*).

Fyzická vrstva - dle standardu IEEE 802.15.7, definuje nejnižší vrstvu síťové architektury. Fyzická vrstva zodpovídá za převod bitů na světelný signál a opačně, převod světelného signálu na signál elektrický. Standard nám vrstvu rozděluje na tři typy podle přenosové rychlosti:

- PHY I – první definovaná vrstva určuje nasazení pro aplikace s nízkou rychlostí přenosu dat (např. komunikace v automobilové dopravě, semaforey, komunikace mezi automobily). Přenosové rychlosti se pohybují mezi 12–267 kbit/s. Definované modulace jsou OOK a VPPM.
- PHY II – druhá definovaná vrstva je připravena pro vnitřní přenosy s přenosovou rychlostí mezi 1.25 - 96 Mbit/s. Mohou být využity modulace OOK a VPPM, stejně jako u PHY I.

- PHY III – třetí definovanou vrstvu využijeme v aplikacích využívající RGB zdroje a detektory. Vrstva dovoluje přenosovou rychlost 12–96 Mbit/s. Využívá se CSK modulace.

Jednotlivé typy fyzických vrstev spolu nespolupracují, ale musí spolu kooperovat. PHY I využívá nižší frekvence (vyšší vlnové délky), zatímco PHY II, III využívá vyšších frekvencí (nižší vlnové délky). Vyšší přenosové rychlosti vrstev PHY II a PHY III potřebují širší spektrum signálu.

MAC vrstva – (*podvrstva linkové vrstvy*) slouží k řízení přístupu k médiu. V aplikacích bezdrátové komunikace pomocí viditelného světla je podpora pro řízení jasu a frekvence. Standard definuje 3 druhy topologie sítě: klient-klient, hvězda a všesměrovou komunikaci. Dále klasifikuje zařízení do tříd: infrastruktura, mobil a vozidlo.

1.3 Topologie sítě

Klient-klient – Základní struktura typu klient-klient. Každé zařízení může komunikovat s ostatními zařízeními v síti. První zařízení je nastaveno jako koordinátor. Obvykle je to první zařízení, které začne komunikovat s druhým zařízením.

Hvězdicová topologie – Struktura typu hvězdice pracuje nezávisle na všech ostatních zařízeních v síti. Jedná se o pojem, který označuje propojení zařízení do útvaru připomínající hvězdici. Každé zařízení je propojeno k centrálnímu prvku. Mezi dvěma zařízeními existuje vždy jen jedna cesta. Při zkolabování centrálního prvku zkolabuje celá síť.

Všesměrová topologie – Všesměrová topologie je založená na principu koordinace vysílaných dat. Koordinátor vysílá data a zařízení nacházející se v oblasti pokryté signálem tyto data mohou přijímat. Tento typ přenosu je pouze jednosměrný.

1.4 Historie

Historie VLC se datuje zpět k roku 1880 ve Washingtonu, D.C. Skotský vědec Alexander Graham Bell vynalezl fotomobil. Fotomobil (*později radiotelefon*) je telekomunikační zařízení, které dokáže převádět hlas na paprsek světla. Byl vynalezen Alexanderem Grahamem Bellem a jeho asistentem Charlesem Sumnerem Tainterem 19. února 1880 v Bellově laboratoři 1325 L Street ve Washingtonu D.C. Oba později spolupracovali s Volta Laboratory. 3. června 1880 Bellův asistent poslal bezdrátovou hlasovou telefonní zprávu přes střechu Franklinské školy do oken Bellovy laboratoře, která byla vzdálena 213 metrů. Bell věřil, že fotomobil byl jeho nejlepší vynález. Před svou smrtí reportérům řekl, že fotomobil je největší vynález, který kdy vyrobil, o mnoho lepší než telefon. Fotomobil byl předchůdce opticko-vláknových komunikačních systémů, které dosáhly světové popularity 80. let 20. století.

Novější práci začali v roce 2003 v Nakagawa Laboratory v Keio University (Japonsko). Využitím LED diod k přenosu dat přes viditelné spektrum. Prototyp měl být představen třemi vysokoškolskými studenty na Universitě de Buenos Aires v 1995, uchýlené k amplitudové modulaci v pásmu 532 nm s použitím laserové diody s výkonem 5 mW a fotodiody jako detektoru. Od té doby jsou zde početné výzkumné aktivity, jmenovitě Smart Lighting Engineering Centre, Omega Project, COWA, ByteLight, Inc., D-Light Project, UC-Light Centre, práce na Oxfordské Universitě a v neposlední řadě také výzkumný tým na VŠB-TUO v Ostravě. V roce 2006 výzkumníci z CICTR (*Center for Information and Communications Technology Research*) na Pensylvánské státní univerzitě navrhli kombinaci PLC (*Power Line Communication*) a bílé LED k poskytování širokopásmového přístupu pro aplikace v budovách. Tento výzkum navrhl technologii jako budoucí řešení přístupu k vnitřní síti.

V lednu 2010 tým výzkumníků Siemens a Fraunhofer institut pro telekomunikace v Berlíně demonstrovali přenos 500 Mbit/s. Byla využita bílá LED na vzdálenost 5 metrů s přenosovou rychlostí 100 Mbit/s. Na větší vzdálenosti bylo použito 5 LED. VLC je normalizováno do standardu IEEE WPAN (802.15.7). V roce 2010 St. Cloud, Minnesota podepsala kontrakt s LVX Minnesota a stali se prvním komerčním rozšiřovatelem této technologie. V roce 2011 byla prezentována živá demonstrace přenosu videa s vysokým rozlišením ze standardní LED lampy na konferenci TED, která se koná každoročně od roku 1990. V poslední době OLED diody byly použity jako optické vysílače k vybudování komunikačního spojení. V říjnu 2014 zahájila společnost Axrtek komerční obousměrný provoz RGB.

Systém s názvem MOMO, který přenáší data v obou směrech přenosovou rychlostí až 300 Mbit/s na vzdálenost 25 stop (7,62 m). V květnu 2015 spolupracoval Philips se supermarketem Carrefour. Poskytoval služby založené na poloze smartphonu nakupujícího v hypermarketu v Lille ve Francii. Vnitřní polohovací systém může být použit i v místech, jako jsou nemocnice, domovy pro seniory, sklady, velké otevřené kanceláře pro lokalizaci osob a pro kontrolu vnitřních robotických vozidel.

2 MODULACE SIGNÁLU

Data reprezentujeme pomocí dvou stavů. Jsou to stavy "ON" (*logická 1*) a "OFF" (*logická 0*). Výhoda spočívá v jednoduchosti generace a dekódování signálu pomocí těchto dvou stavů.

2.1 Modulační rychlost

Modulační rychlost (*Baud Rate*) udává počet přenesených symbolů za sekundu. Jedná se o rychlost, se kterou se mění jednotlivé stavy frekvence nosného signálu. Modulační rychlost můžeme vypočítat ze vztahu:

$$v_m = \frac{1}{T_s} \quad (2.1)$$

kde T_s je hodnota doby trvání signálového prvku.

Maximální modulační rychlost nezávisí na konkrétní modulaci, ale pouze na šířce přenosového pásma. Podle Nyquistova teorému by maximální modulační rychlost neměla překročit dvojnásobek dostupné šířky pásma B . Maximální modulační rychlost vypočítáme ze vztahu:

$$v_{max} = 2 * B \quad (2.2)$$

kde B udává šířku pásma.

Modulační rychlost nám neříká nic o tom, kolik bitů je možné pomocí signálu přenést. Naopak přenosová rychlost nám udává, kolik datových bitů se přenesou za jednotku času. Přenosová rychlost se měří v bitech za sekundu (*bit/s*).

2.2 Přenosová rychlost

Přenosová rychlost udává, kolik bitů se přenesou za jednotku času. Základní jednotkou přenosové rychlosti je bit za sekundu (*bit/s*, *b/s*, nebo anglicky *bps = bits per second*). Jednotka udává, kolik bitů informace je přeneseno za 1 sekundu času. Přenosovou rychlost měříme v bitech za sekundu (*bit/s*). Mezi modulační a přenosovou rychlostí platí vztah:

$$v_p = v_m * \log_2(n) \quad (2.3)$$

,kde n udává počet vzájemně rozlišitelných stavů modulace.

2.3 Šířka pásma

Označuje se písmenem B . Pro její výpočet používáme definice:

- **Absolutní šířka pásma** – je dána rozsahem kmitočtů, ve kterých je hodnota spektrální hustoty signálu nenulová.
- **Šířka pásma pro danou úroveň** – označovaná jako B_3 pro úroveň 3 dB. Šířka pásma B_3 udává kmitočty ohraničený rozsah, kde výkonová spektrální hustota klesne o 3 dB oproti své maximální hodnotě. Dále se používá šířka pásma B_{20} pro úroveň 20 dB. Parametr činitel tvaru pak udává poměr B_{20}/B_3 a udává strmost boků křivky, která ohraničuje spektrum signálu.

2.4 Konstelační diagram

Konstelační diagram reprezentuje signál modulovaný digitálním modulačním schématem. Digitální modulační schémata např. kvadrurní amplitudová modulace a fázová modulace. Signál je zobrazen jako dvourozměrný korelační diagram v komplexní rovině s okamžiky vzorkování symbolů. Konstelační diagram reprezentuje symboly, které mohou být vybrány jako body v komplexní rovině. Konstelační diagram lze využít pro zjištění druhu rušení nebo zkreslení signálu.

Pokud vysílaný symbol reprezentuje komplexní číslo a modulace pomocí cosinu a sinu nosného signálu pomocí reálné a imaginární části komplexního čísla, tak symbol může být odeslán dvěma nosnými na stejném kmitočtu. Tyto nosné nazýváme kvadrurní nosné. Koherentní detektor je schopen demodulovat nosné signály nezávisle. Princip dvou nezávisle modulovaných nosných je základem pro kvadrurní modulaci QAM.

Symboly reprezentujeme jako komplexní čísla. Můžeme je znázornit jako body v komplexní rovině. Reálná a imaginární složka os je nazývána soufázová (*in phase*) nebo osa I a kvadrurní nebo osa Q. Body na konstelačním diagramu nazýváme konstelačními body. Tyto konstelační body tvoří sadu modulačních symbolů, které tvoří modulační abecedu. Demodulátor kontroluje přijatý symbol, který ovšem může být nějakým způsobem poškozen. Demodulátor pak vybírá jako odhad, co bylo skutečně odesláno. Jedná se o bod, který je na konstelačním diagramu nejbližší k přijatému symbolu. Tuto detekci nazýváme detekce metodou maximální věrohodnosti. Konstelační diagram umožňuje jednoduché znázornění tohoto procesu – přijatý symbol nám představuje libovolný bod I-Q rovině a rozhodnutí, že vyslaný symbol je nejbližší konstelační bod. Druhy poškození signálu v konstelačním diagramu jsou zřetelné. Gaussovský šum vypadá jako rozmazaný konstelační bod. Fázový šum vypadá jako rotační rozmazání konstelačních bodů. Útlum způsobuje posun rohových bodů ke středu atd.

2.5 BER

Bitová chybovost (*Bit Error Rate*) posuzuje kvalitu systému, který přenáší data mezi vysílačem a přijímačem. Mezi tyto systémy patří rádiové komunikace, tak i optické komunikace. Tyto systémy jsou ovlivněny hlukem, rušením, fázovým zpožděním a dochází k degradaci signálu. Při datovém přenosu digitálních dat dochází k chybám, které jsou zaváděny do systému. V důsledku těchto chyb je třeba posoudit výkonnost celého systému. Bitová chybovost hodnotí celkovou výkonnost systému od začátku do konce. Zahrnuje vysílač, přijímač i přenosové médium. Bitová chybovost vyjadřuje poměr chybně přijatých bitů k celkovému počtu bitů přijatých dle rovnice:

$$BER = \frac{\text{počet chybně přijatých bitů}}{\text{celkový počet bitů}} \quad (2.4)$$

V případě vysoké kvality přenosového média mezi vysílačem a přijímačem a vysokému poměru signálu k šumu bude bitová chybovost velmi malá.

Bitovou chybovost BER ovlivňují následující faktory:

Interference – Úroveň interference přítomné v systému je stanovena vnějšími faktory a nemůže být snížena konstrukcí systému.

Modulační formáty – Modulační formáty s méně stavy mají nižší bitovou chybovost, avšak také nižší datovou propustnost.

Šířka pásma – S menší šířkou pásma souvisí také nižší bitová chybovost BER, avšak také nižší datová propustnost.

2.6 SNR

Dáme-li do poměru výkon signálu a součet výkonů šumů, které jsou v signálu obsaženy, dostaneme bezrozměrné číslo, tzv. poměr signál-šum. Tento poměr nám udává odstup signálu od šumu a udává se v [dB]. Jak se tedy do užitečného signálu dostane šum? Šum rozdělujeme na vnější a vnitřní. Vnější šum je ten, který se dostane do signálu z vnějších zdrojů rušení. Vnější šum proto můžeme odstranit tím, že odstraníme vnější zdroje rušení. Kromě toho však existuje i zdroj šumu, který je pro vodiče a polovodiče inherentní, a proto jej odstranit nelze. Jsou způsobeny tepelným pohybem nosičů náboje v kovu nebo v polovodiči. V případě porovnání druhů modulace z hlediska odstup signálu od šumu je zřejmé, že zde půjde o šumy vnější, tedy šumy, které se do signálu dostanou při přenosu od vysílače k přijímači. Abychom zvýšili poměr signál – šum SNR, můžeme zvýšit výkon vysílače nebo hloubku modulace.

2.7 Digitální modulace

Digitální modulaci můžeme rozdělit podle počtu stavů na dvoustavové modulace a více stavové modulace. Dvoustavová modulace můžou přenést v jednom stavu pouze informaci o jednom bitu. Vícestavové modulace můžou přenést v jednom stavu najednou více bitů. To znamená, že vícestavová modulace při stejné šířce pásma dokáže zvýšit přenosovou rychlost.

2.7.1 Dvoustavové digitální modulace

Dvoustavovou modulaci můžeme rozdělit na typ modulace amplitudy nosného signálu Amplitude Shift Keying (*ASK*), modulaci frekvence nosného signálu Frequency Shift Keying (*FSK*) a modulaci fáze nosného signálu Phase Shift Keying (*PSK*).

ASK – Klíčování amplitudovým posuvem

Při ASK modulaci využíváme změnu amplitudy nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě diskrétního signálu. Využíváme stavy, které nám reprezentují logickou "1" a logickou "0". Při vysílání logické jedničky je přenášen kmitočet nosné a při vysílání logické nuly se signál nepřenáší.

FSK – Klíčování frekvenčním posuvem

Při FSK modulaci využíváme změny frekvence nosného signálu v závislosti na okamžité hodnotě diskrétního signálu. Využíváme rovněž dvou stavů, které nám reprezentují hodnoty logické "1" a logické "0". Při vysílání logické nuly je přenášen dvojnásobný kmitočet nosného signálu než při vysílání logické nuly.

$$f_1 = f_n - \Delta f \text{ a } f_2 = f_n + \Delta f \quad (2.5)$$

,kde f_n nám udává kmitočet nosného signálu a Δf nám udává odchylku kmitočtu od kmitočtu nosné vlny.

PSK – Klíčování fázovým posuvem

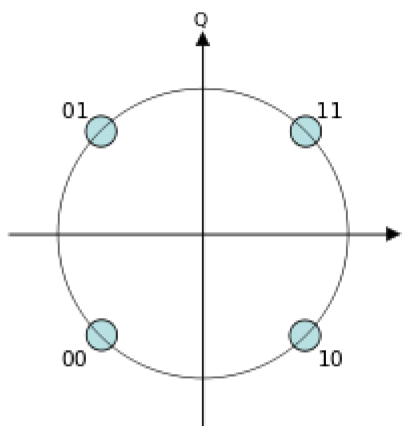
Při PSK modulaci využíváme změnu fáze nosného signálu. Pokud vysíláme logickou "1", pak je fáze nosné vlny posunuta o 0° a pokud je vysílána logická "0", pak je fáze nosné vlny posunuta o 180° podle současné hodnoty modulovaného signálu.

2.7.2 Vícestavové digitální modulace

Vícestavové digitální modulace mohou přenášet více bitů v jednom stavu. Využíváme je kvůli zvýšení přenosové rychlosti při zachování stejné šířky pásma. Nevýhodou vícestavových digitálních modulací je jejich náchylnost vůči rušení. Proto se kladе velký důraz na odstup signálu od šumu SNR. Nejpoužívanější vícestavové modulace jsou M-PSK a M-QAM.

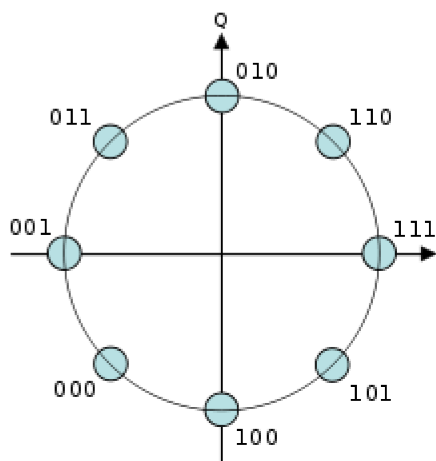
Vícestavové klíčování fázovým posuvem (M-PSK)

Vícestavové klíčování fázovým posuvem dělíme na několik typů daných počtem stavů. Např. modulace QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) umožňuje přenést v jednom stavu současně 2 bity (*tzv. dibit*).



Obr. 2.1: Konstelační diagram modulace QPSK

Modulace typu M-PSK je 8-PSK. Využívá pro přenos 8 různých stavů a každým stavem je možné přenést tři bity (*tzv. tribit*).

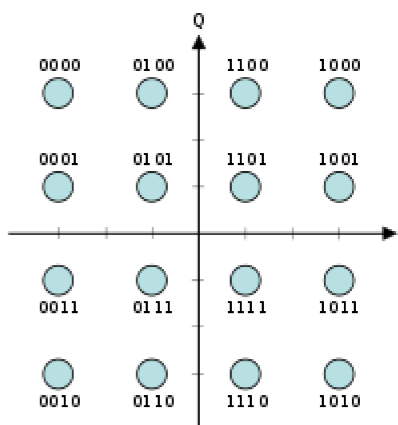


Obr. 2.2: Konstelační diagram modulace 8-PSK

Modulace typu M-PSK je i 16-PSK. Využívá pro svůj přenos dat 16 různých stavů a každým stavem můžeme přenést 4 bity (tzv. *kvdatbity*).

Kvadrurní amplitudová modulace

QAM – Kvadrurní amplitudová modulace (*Quadrature amplitude modulation*). Jedná se o vícestavovou modulaci. Využívá se v mikrovlnných digitálních systémech nebo u digitálního kabelového vysílání. QAM modulace je efektivní typ modulace. Využívá kombinaci fázového a amplitudového klíčování. V konstelačním diagramu je každý bod reprezentován velikostí fáze a amplitudy.



Obr. 2.3: konstelační diagram modulace 16-QAM

Základním typem je čtyřstavová modulace 4-QAM, která umožňuje stejně jako QPSK jedním stavem přenést 2 bity. Rozšířením čtyřstavové modulace 4-QAM je modulace typu 16-QAM. Modulace toho typu využívá 16 stavů a jedním stavem umožňuje přenést 4 bity současně. V současnosti se využívá i 512-QAM, která dokáže přenést jedním stavem 9 bitů, popř. 1024-QAM, která umožňuje přenést jedním stavem až 10 bitů.

Tab. 2.1: Porovnání M-QAM modulací

Typ modulace	Počet stavů	bit/stav	Max. přenosová rychlost [Mbit/s]	S/N [dB]
4-QAM	4	2	56	13,6
16-QAM	16	4	112	20,4
32-QAM	32	5	140	23,5
64-QAM	64	6	162	25
128-QAM	128	7	196	26,4
256-QAM	256	8	224	28,4

Tab. 2. 2: Počet přenesených bitů jedním stavem u M-PSK modulace

Typ modulace	Počet bitů na stav
BPSK	1 bit
QPSK	2 bity
8-PSK	3 bity
16-PSK	4 bity

3 STANDARD IEEE 802.15.1

Technologie Bluetooth je popsána v doporučení IEEE 802.15.1. Pracuje v ISM pásmu na kmitočtu 2,4 GHz. Princip technologie Bluetooth je založen na náhradě lokálních kabelů bezdrátovou technologií umožňující přenosu dat na krátkou vzdálenost. Jedná se o univerzální radiokomunikační systém, který umožňuje bezdrátově komunikovat s přenosovou rychlostí až 24 Mbps. Bluetooth je využitelný pro krátké vzdálenosti pro přenos dat. Technologie umožňuje bezdrátově propojit dvě a více elektronických zařízení jako například mobilní telefon, senzorový systémy, osobní počítač, PDA nebo bezdrátová sluchátka. Dochází k odstranění nutnosti použití metalických kabelů. Bluetooth pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz (*Industrial-Scientific-Media band, ISM*), v rozsahu 2,400 GHz - 2,4835 GHz a využívá digitální modulaci GFSK. Využití frekvenčního skoku s rozprostřeným spektrem (*FHSS*) má za cíl snížit rušení mezi technologiemi pracujícími ve spektru 2,4 GHz. Metoda přenosu dat v rozprostřeném spektru FHSS má vysoký stupeň imunity vůči rušení a umožnění efektivního přenosu dat. Princip metody spočívá v přeskakování mezi několika frekvencemi při přenosu dat. Ve vytvořené „pikosíti“ udává pořadí frekvencí zařízení Master. Následně je pokračováno v pseudonáhodném pořadí, čímž je zajištěno, že v každé pikosíti budou jiné hodnoty frekvencí. Takto je možné provozovat co největší možný počet nezávislých „pikosítí“ v malém prostoru. Metoda FHSS využívá rychlost 1600 přeskoků za sekundu. Zařízení typu Slave mají na začátku vysílání časovou prodlevu 625 μs od zařízení „master“. Prodlevy se počítají v závislosti na hodinách zařízení „master“. „Master“ může zahájit přenos pouze na začátku sudé časové prodlevy a zařízení „slave“ naopak na začátku liché časové prodlevy. Verze Bluetooth 4.0 se objevila v roce 2011. Nabízí menší energetickou náročnost a podporu šifrování AES-128. Bluetooth verze 4.2 byla vydána v prosinci 2014 a zahrnuje protokol 6LoWPAN, který ke komunikaci využívají Smart LED technologie.

3.1 Bezdrátové osobní sítě (WPAN)

V originále se osobní bezdrátové sítě označují jako WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Sítě WPAN jsou omezeny do krátkých vzdáleností cca 1–100 m v závislosti na vysílacím výkonu. Jednotlivé třídy definují vysílací výkon. Pro Bluetooth třídy 1 je definován vysílací výkon 100 mW (20 dBm). Třída 2 definuje vysílací výkon na 2,5 mW (4 dBm) a pro třídu 3 je definován vysílací výkon 1 mW (0 dBm). WPAN sítě jsou popsány v doporučení.

Zařízení se dělí dle výkonnosti do tříd:

Tab..3.1: *Třídy zařízení Bluetooth*

Třída	Max. povolený výkon	Dosah signálu
Class 1	100 mW (20 dBm)	100 m
Class 2	2,5 mW (4 dBm)	10 m
Class 3	1 mW (0 dBm)	1 m

Maximální teoretické přenosové rychlosti dat:

Tab. 3.2: Maximálních teoretických přenosových rychlostí

Verze	Rychlost přenosu dat	Maximální propustnost
Verze 1.2	1 Mbit/s	0,7 Mbit/s
Verze 2.0 + EDR	3 Mbit/s	1,4 Mbit/s
Verze 3.0 + HS	24 Mbit/s	
Verze 4.0	24 Mbit/s	

3.2 Specifikace rádiového rozhraní

Bluetooth pracuje v ISM pásmu 2,4 GHz a při přenosu využívá metody FHSS, kdy v jedné sekundě je provedeno 1600 skoků (přeladění) mezi 79 frekvencemi s rozstupem 1 MHz. Díky tomuto mechanismu se podaří zvýšit odolnost spojení vůči rušení na stejné frekvenci. Pokud jsou mezi komunikujícími zařízeními překážky, dosah klesá a postupně se zvyšuje počet chybně přenesených paketů. Je možné vytvořit datový spoj symetrický i asymetrický. Zařízení definujeme pomocí své adresy BD_ADDR (BlueTooth Device Address) podobně jako je MAC adresa u Ethernetu.

Technologie podporuje P2P (*peer-to-peer*) dvoubodovou komunikaci a P2MP (point-to-multipoint) vícebodovou komunikaci. Pokud je do jedné sítě PAN připojeno více komunikujících zařízení, působí jedna rádiová stanice jako řídicí člen „master“ a ostatní jsou jí podřízené v režimu „slave“. Takto definujeme nejmenší ad-hoc síť tzv. „piconet“. Jedna rádiová stanice může simultánně obsloužit až 7 podřízených „slave“ zařízení. Všechna zařízení v pikosíti se synchronizují s taktem řídicí stanice a se způsobem přeskočení mezi kmitočty. Specifikace dále definuje maximální možný počet stanic připojených k zařízení master a to je 7 podřízených zařízení "slave" připojených k řídicí stanici "master". Specifikace také definuje použití až 10 „pikosítí“ na ploše o průměru 10 metrů, které dále sdružuje do tzv. „scatternetů“ (rozprostřených sítí).

Implementace Bluetooth je podobná jako u Wi-Fi. Definuje způsob tzv. ad-hoc komunikace, u které nezávisí na předem existující infrastruktuře, jako jsou routery v kabelových sítích, nebo přístupové body v bezdrátových sítích. Místo toho se určité uzly podílí na předávání dat jiným uzlům a jejich určení je prováděno dynamicky na základě síťové konektivity. Technologie Bluetooth řeší sama o sobě vyšší vrstvy až aplikační vrstvy síťového modelu. Každý typ připojitelného zařízení musí mít definován speciální protokol, pomocí kterého bude komunikovat s určitým typem zařízení. Bluetooth protokoly usnadňují rozpoznání a nastavení služeb mezi jednotlivými zařízeními. Bluetooth umožňuje více zařízením zároveň komunikovat přes jeden sdílený adaptér.

3.3 Specifikace jednotlivých verzí

Bluetooth v 1.0 a v 1.b

- Schválena v roce 2002 jako standard IEEE 802.15.1.
- Mnoho chyb u verze 1.0 b.
- Přidána podpora pro nešifrované kanály.
- Implementován indikátor síly signálu RSSI, jenž udává hodnotu rozdílu $RSCP$ a Ec/IO [dBm].

Bluetooth v 1.2

- Zpětně kompatibilní s verzí 1.1.
- Nabízí rychlejší připojení a vyhledávání zařízení.
- AFH zlepšuje odolnost vůči rádiovému rušení.
- Nabízí vyšší přenosové rychlosti až do 721 kbit/s.

Bluetooth v 2.1 + EDR

- Zpětně kompatibilní s předešlou verzí.
- Specifikace verze 2.1 + EDR byla přijata sdružením Bluetooth SIG 26. července v roce 2007.
- Umožňuje bezpečné a jednoduché párování a zvyšuje bezpečnost.

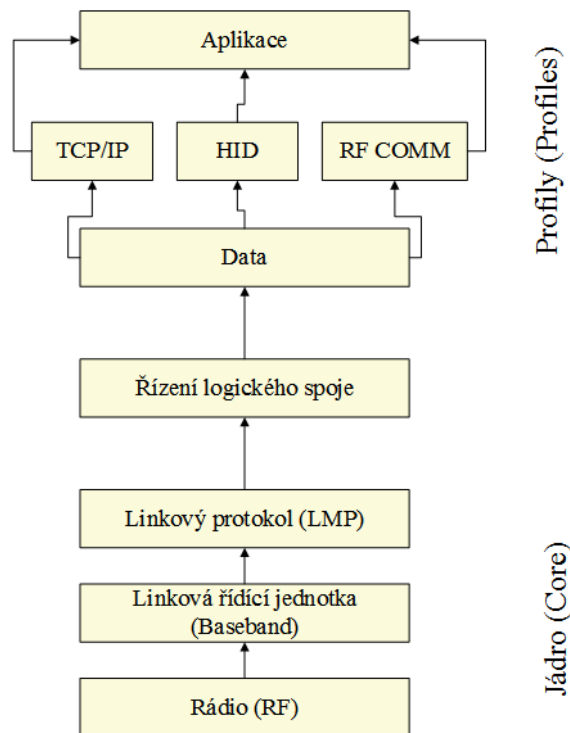
Bluetooth v3.0 + HS

- Specifikace byla přijata Bluetooth SIG dne 21. dubna 2009.
- Podporuje teoretickou přenosovou rychlost až 24 Mbit/s.
- Bluetooth je použito k navázání spojení a vysokorychlostní přenos se provádí přes souběžné spojení 802.11.
- Vysokorychlostní přenos není povinnou součástí specifikace, a tudíž pouze zařízení s označením *HS "High Speed"* budou skutečně podporovat vysokorychlostní přenos dat Bluetooth přes Wi-Fi.
- Přenos dat umožňuje použití alternativní vrstvy MAC a PHY. Bluetooth je využíváno k vyhledávání zařízení, k počátečnímu připojení a konfiguraci. K posílání většího množství dat je použita vysokorychlostní MAC PHY 802.11.
- Určen pro aplikace vyžadující krátkou odezvu.

Bluetooth v4.0

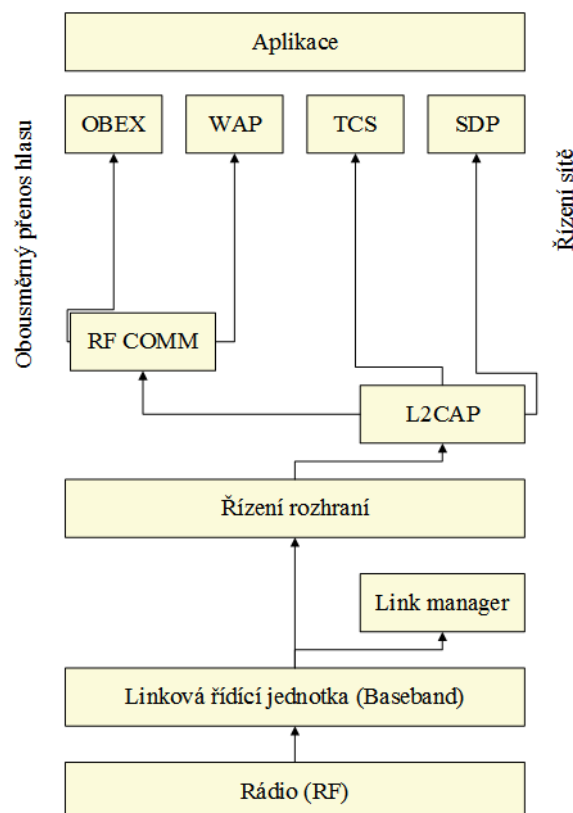
- Specifikace Bluetooth verze 4.0 byla vydána v červenci 2010.
- Klíčovou vlastností je nízkoeenergetická náročnost.

Technologie realizuje koncept WPAN sítí. Je koncipována jako ekonomicky nenáročná bezdrátová technologie s malým dosahem. Obvykle se radius pokrytí signálem uvádí 10-100 metrů, ale záleží na vnějších faktorech, použité třídě, vysílacím výkonu Bluetooth modulu, popř. využití externí antény. Technologii využíváme pro propojení zařízení v rámci krátké vzdálenosti několika metrů. Nahrazuje nám fyzické použití metalických kabelů. V roce 1994 společnost Ericsson přišla s ideou náhrady kabelů pro připojení příslušenství bezdrátovým přenosem na krátkou vzdálenost. Nový standard měl potenciálně široké využití na trhu. Důležitá byla kooperace s více strategickými partnery v odvětví bezdrátových komunikací. Právě z těchto důvodů vznikla v roce 1998 skupina SIG (*The Bluetooth Special Interest Group*) a v roce 1999 byl vydán první standard. Specifikaci dělíme do dvou logických částí: jádro a profily. Specifikace jádra vychází z vrstevového modelu a obsahuje soubor protokolových pravidel pro správnou funkci. Začíná na nejnižší vrstvě a pracuje pro vrstvy vyšší, softwarově orientované.



Obr. 3.1: Základní specifikace Bluetooth

Protokoly jsou charakterizovány protokolovým referenčním modelem. Vrstva rádio pro nás představuje fyzickou vrstvu. Zahrnuje přijímač a vysílač pro zprostředkování obousměrné komunikace. Podvrstva Baseband sestavuje pakety a předává je Rádio vrstvě. Podvrstva Link Controller poskytuje komplexní stavové operace a "standby" pohotovostní režim, "connect" režim připojeno, "low-power" režim nízké spotřeby. Funkce těchto podvrstev je sloučena do společné vrstvy. Vrstva Link Manager poskytuje řízení a konfiguraci linky prostřednictvím HCI (*Host Controller Interface*). L2CAP (*Logical Link Control and Adaption Protocol*) sestavuje virtuální přenosové kanály mezi koncovými zařízeními. Protokol L2CAP také provádí segmentaci a zpětnou desegmentaci aplikačních dat. Protokolová vrstva RFCOMM (*Radio Frequency Communication*) tvoří emulátor pro sériový port. Pod aplikační vrstvou definujeme protokoly, které využívají různé modely využití technologie Bluetooth. Mezi tyto protokoly patří například SDP (*Service Discovery Protocol*), OBEX (*Object Exchange Protocol*), TCS (*Telephony Control Protocol Specification*) a WAP (*Wireless Application Protocol*).



Obr. 3.2: Referenční model (protokoly)

Technologie může být také použita pro realizaci obousměrného přenosu digitalizovaného hlasu v reálném čase. Tento typ dat je tvořený aplikační vrstvou a je přenášen přímo do Baseband vrstvy přes HCI. Je to z důvodu, aby nedocházelo k neakceptovatelnému zpoždění průchodem jednotlivých vrstev. Řídicí funkce také nevyužívají vrstvy mezi HCI a aplikační vrstvou.

Rádio vrstva představuje fyzickou vrstvu. Rádio vrstva je nejnižší (fyzickou) vrstvou celého Bluetooth modelu. Zahrnuje vysílač a přijímač pro zprostředkování obousměrné rádiové komunikace a anténu. Funguje v bezlicenčním frekvenčním pásmu ISM (*Industry, Science, Medical*) v rozsahu 2,402-2,480 GHz. Pásmo je značně ohroženo rušením jiných zdrojů záření, zejména mikrovlnných trub a bezdrátových technologií 802.11 b, g. Aby nedocházelo k obsazení přenosových kanálů rušením, umožňuje technologie změnu přenosového kanálu tzv. "hopem" (*skokem*). Využívá k tomu metody FHSS (*Frequency Hop Spread Spectrum*). Pro různé rádiové systémy je charakteristický jiný typ modulace užitečného signálu na signál nosný pomocí klíčování.

Nejčastějšími metodami je amplitudová modulace ASK (*Amplitude Shift Keying*), fázová modulace PSK (*Phase Shift Keying*), frekvenční modulace FSK (*Frequency Shift Keying*) nebo stavová modulace OOK (*On Off Keying*). Vzhledem k poměru akceptovatelného SNR (*Signal-to-noise-ratio*) a hodnotám BER (*Bit Error Rate*) nabízí lepší odolnost vůči rušení frekvenční modulace. Vzhledem k povolené šířce kanálu, která činí pouze 1 MHz se používá pro filtrování užitečného signálu dolní propust s Gaussovou odezvou. Takové modulaci říkáme Gaussova frekvenční modulace GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*). Vysílací a přijímací část obsahuje nejenom GFSK modulátor/demodulátor, ale také generátor nosné frekvence, který je řízen generátorem "hop" kódu. Generátory "hop" kódu na vysílací i přijímací straně musí být dokonale synchronizovány, aby přijímač vždy naslouchal v tom kanále, ve kterém vysílač vysílá. Nosná frekvence se mění 1600krát za sekundu podle dané posloupnosti frekvencí (*Hopping Sequence*), která je pseudonáhodná a musí být před zahájením komunikace známa

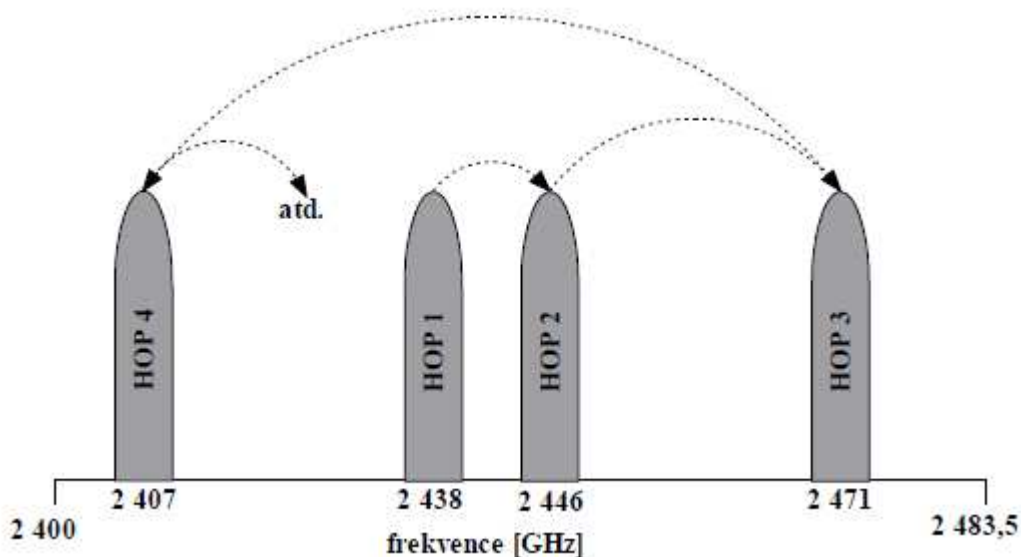
generátorům "hop" kódu na obou stranách přenosu. Během setrvání na jediném přenosovém kanále je přenesen jeden paket.

Pro komunikace dvou Bluetooth zařízení pomocí metody FHSS (*Frequency Hop Spread Spektrum*) musí platit, že:

- Musí být použit stejná množina kanálů.
- Musí být použita stejná posloupnost frekvencí.
- Musí být provedena vzájemná synchronizace pro změnu frekvencí.
- Musí být zajištěno naslouchání jednoho zařízení v momentě, kdy druhé zařízení vysílá.

FHSS pracuje s danou množinou nosných frekvencí, která je nazývána množinou kanálů (*channel set*). Množina kanálů sestává z frekvencí $f_c = 2,402 + k\text{GHz}$ [GHz],

pro $k = 0, 1, 2, \dots, 78$, což znamená, že je zde 79 frekvenčních kanálů, každý z nich je široký 1 MHz v pásmu od 2,402 do 2,480 GHz. Sekvence, která udává pořadí kanálů, je nazývána posloupností frekvencí.



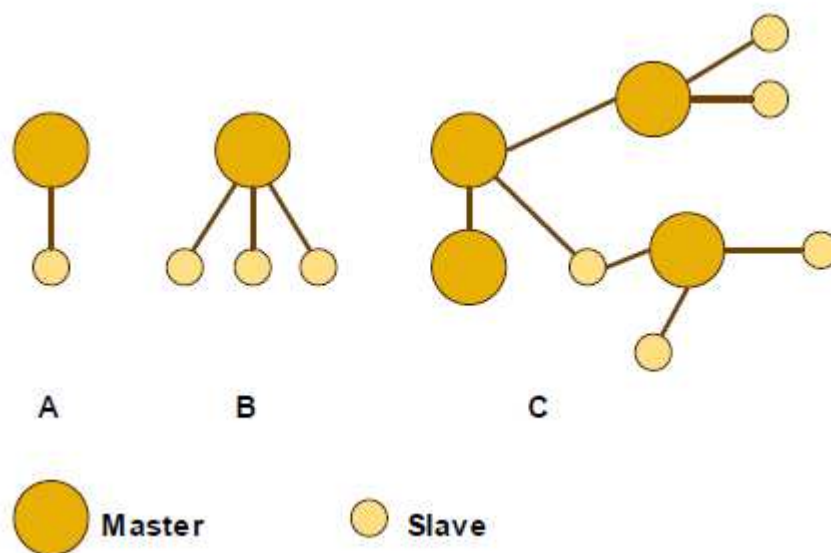
Obr. 3.3: Princip frekvenčních skoků

Vysílač představuje zdroj elektromagnetického vlnění ve 2,45 GHz v ISM pásmu. Samozřejmě zde dochází také k nežádanému vyzařování mimo povolené pásmo. Bluetooth vysílače rozdělujeme do tří základních tříd dle výšlaciho výkonu.

- Třída 1 - výšlaci výkon 100 mW (20 dBm).
- Třída 2 - výšlaci výkon 2,5 mW (4 dBm).
- Třída 3 - výšlaci výkon 1 mW (0 dBm).

Třída 1 musí podporovat funkci řízení výšlupního výkonu (*Power Control*), u třídy 2 a 3 je tato funkce nepovinná. Funkce řízení výšlupního výkon vyžaduje přijímač, který je schopen řídit výšlaci výkon vysílače. Přijímač komunikuje s vysílačem a předává mu pokyny pro zvýšení či snížení výšlaciho výkonu. Pokud se signál přijímaný přijímačem pohybuje mezi stanovenou mez, vysílá přijímač

požadavek na změnu výstupního výkonu vysílače. Změna je provedena s krokem 2 nebo 8 dB. Bluetooth přijímač je klasickým rádio detektorem. Při stanovené citlivosti přijímače nesmí hodnota BER překročit 0,1 %. Předepsaná minimální citlivost přijímače je -70 dBm. Horní hranice intenzity přijímaného signálu je -20 dBm. Nejdůležitější parametr charakterizuje jeho odolnost vůči rušení, což vyjadřuje poměr C/I mezi užitečným (C) a rušivým (I) signálem. Vrstva Baseband má hlavní úkol sestavovat pakety a předávat je Rádio vrstvě. Je potřeba zajistit, aby v daný okamžik na jedné straně vysílal vysílač a na straně druhé byl připraven naslouchat přijímač. Plní tedy důležitou funkci pro správnou synchronizaci. Ta je zajištěna zařízením typu "master", ostatní s ním komunikují jako podřízená zařízení typu "slave". Každé Bluetooth zařízení může plnit funkci typu "master" nebo "slave". Zařízení typu "master" zajišťuje zařízení, které inicializuje spojení. Komunikace může probíhat pouze mezi zařízením typu "master" a "slave". V případě komunikace jednoho zařízení typu "master" a jednoho zařízení typu "slave" se jedná o přímou komunikaci mezi zařízením (*point-to-point*). V případě komunikace jednoho zařízení typu "master" a více zařízeními typu "slave" se jedná o vícebodovou komunikaci (*point-to-multipoint*). Zařízení typu "master" může řídit až 7 zařízení typu "slave". Komunikace vždy probíhá pouze mezi zařízením typu "master" a "slave". Komunikace nikdy nemůže probíhat mezi jednotlivými zařízeními typu "slave". U komunikace vždy musí být přítomen řídicí člen typu "master". Zařízení typu "master" společně se zařízeními typu "slave" tvoří tzv. "pikosít" (*piconet*). V rámci jedné oblasti lze zabezpečit komunikaci mezi jednotlivými "pikosítěmi" a celá tato komunikující soustava pak tvoří tzv. "rozptýlenou síť" (tzv. *scatternet*).



Obr. 3.4: Pikosít' (tzv. piconet) a rozptýlená síť (tzv. scatternet)

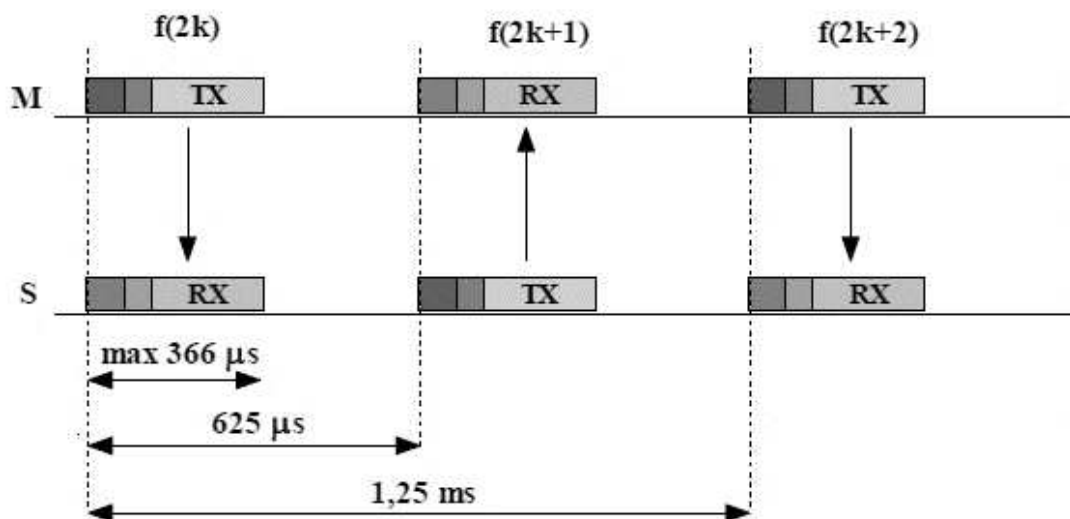
3.4 Struktura paketu

Základní struktura je použita u všech aplikací. Bluetooth paket obsahuje přístupový kód (*Access Code*). Přístupový kód je 72 bitů dlouhý a zajišťuje synchronizaci bitů i slov, může obsahovat identitu sítě nebo adresu příjemce. Paket dále obsahuje 54 bitů dlouhé záhlaví „Header“. Záhlaví zahrnuje cílovou adresu, typ přenášených užitečných dat a informace pro kontrolu chyb. Dále je do paketu umístěna užitečná informace proměnné délky (*max. 2745 bitů*).

Přístupový kód (Access Code) 72 bitů	Záhlaví (Header) 54 bitů	Užitečná informace (Payload) 0-2745 bitů
---	-----------------------------	---

Obr. 3.5: Struktura Bluetooth paketu

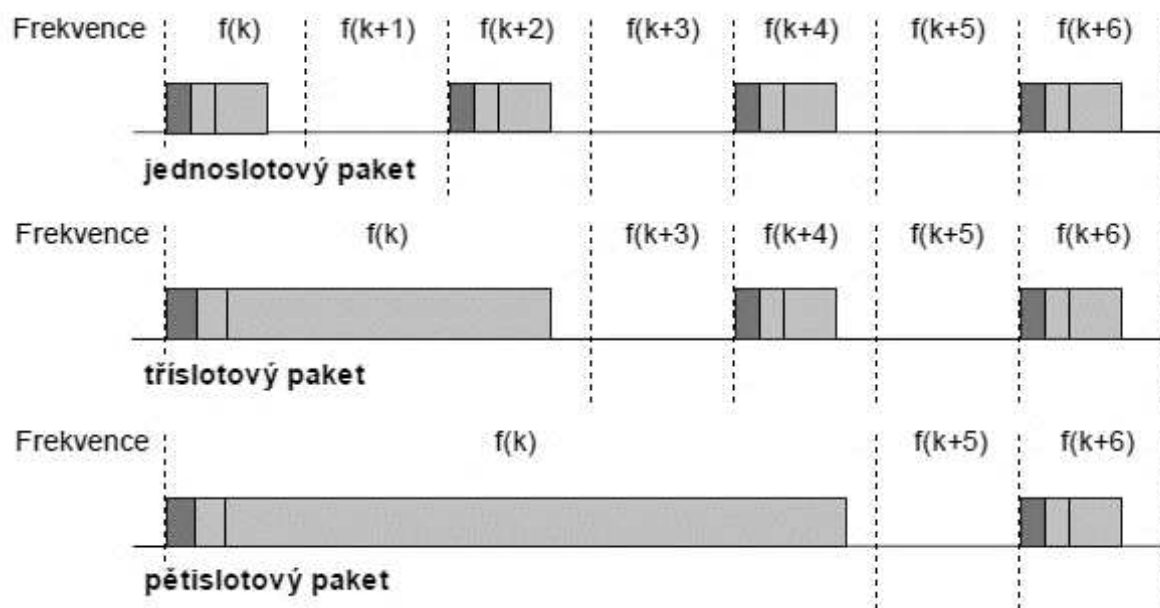
Čas přenosu je dělen do slotů, které jsou $625\ \mu\text{s}$ dlouhé. Zařízení typu "master" vysílá v lichých slotech, zatímco zařízení typu "slave" vysílá v sudých slotech. Každý přenos je uskutečněn na nové nosné frekvenci a v jednom slotu je přenášen pouze jeden paket. Maximální doba trvání paketu je $366\ \mu\text{s}$ ($366\ \text{bitů}$), zbylý čas $259\ \mu\text{s}$ je potřebný pro změnu nosné frekvence. Platí pro přímou komunikaci typu bod – bod (*point-to-point*).



Obr. 3.6: Struktura přenosu dat komunikace typu "point-to-point"

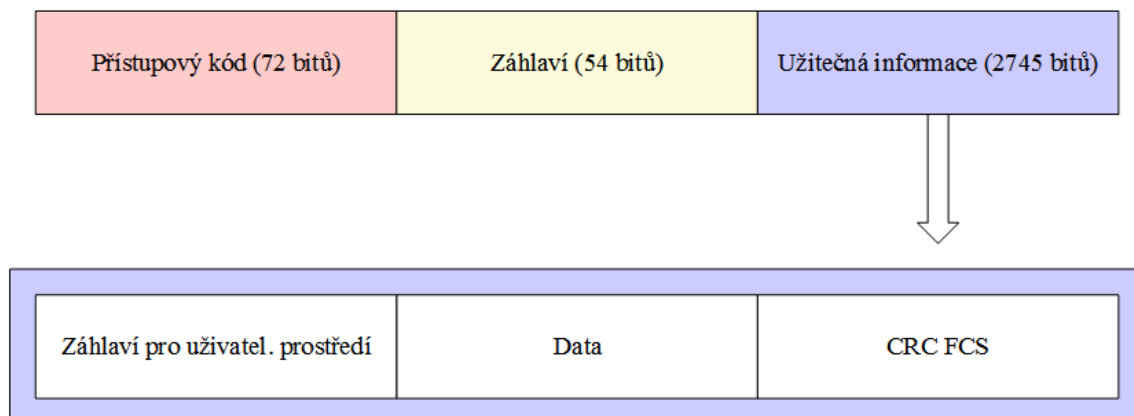
Pro komunikaci typu bod – více bodů (*point-to-multipoint*) zařízení typu "master" opět využívá lichých slotů pro komunikaci s jednotlivými zařízeními typu "slave". V sudých slotech pak odpovídá pouze zařízení typu "slave", které bylo zařízením typu "master" v předcházejícím slotu vyzváno ke komunikaci. V momentě vysílání zařízení typu "master" dekodují přijímače všech zařízení typu "slave" pouze přístupový kód a záhlaví a v užitečné informaci pokračuje pouze zařízení, pro něž je paket určen. Pokud zařízení typu "master" vyšle broadcast paket, potom ho přijmou všechny přijímače, ale žádné zařízení na něj neodpoví (*následující slot je volný*).

Ze slotu o délce trvání $625\ \mu\text{s}$ je využito pro užitečnou informaci pouze 240 bitů z 366 bitů dlouhého paketu (66%). To odpovídá obousměrné přenosové rychlosti $384\ \text{kbit/s}$ ($192\ \text{kbit/s}$ na uzel pro *point-to-point* komunikaci). Tato rychlost se ještě sníží kontrolou chyb. Pro zvýšení propustnosti je možné přenos víceslotových (3 a 5) paketů. Během přenosu těchto víceslotových paketů se nosná frekvence nemění. Nosná frekvence se změní až po přenosu paketu na hodnotu odpovídající frekvenci v případě, že by místo víceslotových byly přenášeny jednoslotové pakety s běžnými změnami nosné.



Obr. 3.7: Bluetooth víceslotové pakety

Rozlišujeme datové pakety se střední přenosovou rychlostí DM (*Data Medium*) a s vysokou přenosovou rychlostí DH (*Data High*). U DM paketů je na pole užitečných informací aplikován zkrácený Hammingův kód, zatímco pakety DH nemají žádnou dopřednou kontrolu chyb FEC.



Obr. 3.8: Jednoslotové pakety

3.5 Protokoly jednotlivých vrstev

Protokol LMP (Link Manager Protocol)

Popisuje proceduru využívanou k nastavení komunikace mezi Bluetooth zařízeními. Vrstva Link Controller poskytuje stavové operace typu "standby" pohotovostní režim, "connect" spojeno, "low-power" nízká spotřeba. Vrstva Link Manager poskytuje řízení a konfiguraci linky prostřednictvím protokolu LMP. LMP pakety neobsahují uživatelská data.

Základní procedury protokolu LMP:

- základní zprávy odezvy,
- autentifikace,
- párování,

- kódování,
- QoS (Quality of Services),
- řízení víceslotových paketů.

L2CAP (Logical Link Control and Adaption Protocol)

Tento protokol sestavuje virtuální přenosové kanály mezi koncovými zařízeními. Hostitelské zařízení mohou provádět např. přenosy souborů. L2CAP také provádí segmentaci a desegmentaci aplikačních dat. Přípravuje data a monitoruje spojení pro spojově orientované a spojově neorientované služby. Tyto služby nabízí protokolům vyšších vrstev.

Vrstva L2CAP musí plnit tyto funkce:

- Multiplexování protokolu – L2CAP musí komunikovat s vyššími vrstvami. Komunikace je obousměrná.
- Segmentace a znovu sestavení – Protože vyšší vrstvy využívají 64 kB dlouhé datové bloky, musí L2CAP provádět segmentaci na menší celky, které předává nižším vrstvám. Zabezpečuje i opačný postup desegmentace z menších celků na větší.
- QoS – požadavky na šířku pásma, zpoždění apod.

Synchronní spojově orientované (SCO) linky

Jsou používány v případě, že hodnoty zpoždění je důležitější než neporušenost dat. Tyto linky jsou využívány při obousměrném přenosu hlasu v reálném čase.

Asynchronní nespojově orientované (ACL) linky

Jsou používány v případě, že hodnota neporušenosti dat je důležitější než hodnota zpoždění. Pakety jsou přenášeny ze strany zařízení typu "slave" pouze v případě, že ho v předchozím time-slotu k tomu zařízení typu "master" vyzvalo. V případě poruchy při přenosu, kterou zjistí přijímač při kontrole chyb, je paket znovu přeposlán.

SDP (Service Discovery Protocol)

Tento protokol vyhledává v okolí Bluetooth a zjišťuje jeho nabídku služeb. SDP mechanismus poskytuje prostředky pro klienty k zjištění existence služeb a jejich atributů. Atributy obsahují typ nebo třídu nabízené služby (popis protokolu) a informace o mechanismu nebo informaci protokolu (data).

Vrstva RFCOMM (Radio Frequency Communication)

Vrstva tvoří Bluetooth emulátor sériového portu COM. Pod aplikační vrstvou jsou definovány různé protokoly, které využíváme pro různé modely využití Bluetooth technologie. Protokol odstraňuje nutnost použití sériového kabelu pro komunikaci přes sériový port. RFCOMM obsahuje dva popisy, jak by měla být použita emulace sériového portu.

- Typ 1 zařízení jsou koncové body komunikace (počítač, tiskárna).
- Typ 2 zařízení jsou části komunikačního segmentu (modem).

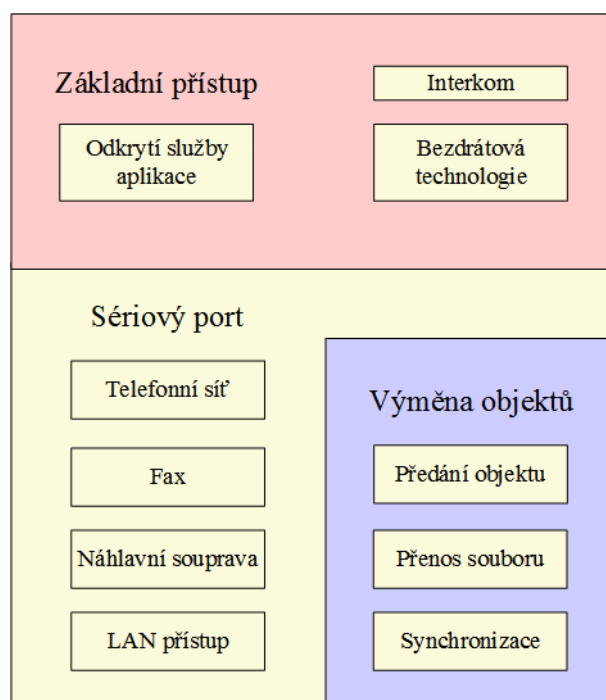
Kromě přenosu dat může být technologie využita také k obousměrnému přenosu digitalizovaného hlavy v reálném čase. Tento typ dat tvořený aplikační vrstvou je přímo přenášen do Baseband vrstvy přes HCI (*Host Controller Interface*), aby nedocházelo k nežádoucímu zpoždění průchodem

jednotlivými vrstvami. Existují čtyři skupiny, které nám definují, jak budou jednotlivá rozhraní pracovat.

- HCI Funkční specifikace
- HCI USB transportní vrstva
- HCI RS232 transportní vrstva

3.6 Bluetooth profily

Byly definovány technologické profily ke zvýšení efektivnosti komunikace mezi zařízeními. Slouží k rozlišení technických možností jednotlivých zařízení. Zajišťují jejich vzájemnou slučitelnost na nejvyšší možné softwarové úrovni. Zatímco modely použití (Usage Modules) popisují obecně aplikace a zařízení, profily specifikují možnosti využití Bluetooth protokolu pro konkrétní kompatibilní zařízení. V současnosti je stanoveno 13 profilů.



Obr. 3.9: Bluetooth profily

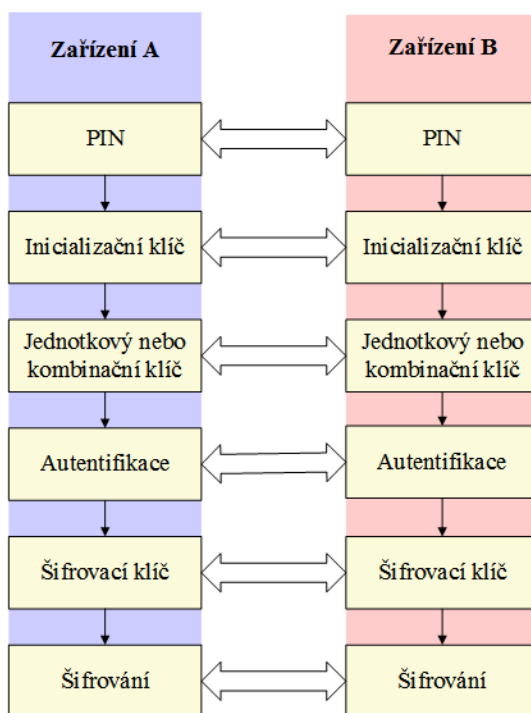
3.7 Bezpečnost technologie

Bluetooth technologie má bezpečnostní operace implementované již do linkové vrstvy. V podstatě lze hovořit o třech typech hrozby narušení bezpečnosti přenosu:

- zjevné narušení – přístup žádá neautorizovaná osoba.
- skryté – nebezpečí odposlechu nebo falsifikace dat.
- znemožnění poskytování služby.

Zařízení se může nacházet v jednom ze stavů: izolovaný „Silent“ neumožňuje uskutečnit funkci, soukromý „Private“ - umožňuje pouze uskutečnit funkci "page" nebo veřejný „Public“. Proces zabezpečení má několik úrovní. Je třeba zadat do obou zařízení společný 128 bitový inicializační kód pro zabezpečení inicializace zařízení. Následuje proces autentifikace, což je ověření totožnosti připojujících se zařízení. K zabezpečení slouží společný linkový klíč (128 bitů). Poslední volitelným procesem je šifrování přenášených dat šifrovacím 128 bitovým klíčem. V souvislosti se zabezpečením se jedná o procesy: párování „Pairing“ - zadání PIN na obou stranách, vytvoření společného linkového klíče pro autentifikaci, závazek „Bonding“ - umožňuje již jednou ověřeným zařízením neopakovat autentifikaci.

Důvěryhodnost „Trust“ slouží k označení důvěryhodných (již ověřených) zařízení pro přístup k jednotlivým službám. Jednotlivé klíče jsou generovány algoritmy pomocí vstupních (PIN) kódů a náhodně generovaných čísel. Vše provádí vrstva LC, ovšem pro přenos dat je řízen vrstvou LM a požadavky aplikační vrstvy jsou plněny vrstvou L2CAP. Linkové klíče dělíme do více druhů, a to inicializační klíče pro prvotní inicializaci zařízení, jednotkové klíče generované pouze z jednoho zařízení, kombinační klíče generované z obou zařízení a klíče zařízení master generující dočasné klíče.



Obr. 3.10: Struktura zabezpečení Bluetooth přenosu dat

4 ZÁKLADNÍ TYPY POUŽÍVANÝCH ANTÉN

Anténu můžeme definovat jako zařízení pro vyzařování nebo příjem rádiových vln. Je to část vysokofrekvenčního vedení upravená tak, aby účinně vyzařovala energii do prostoru. Jedná se o hraniční prvek radiokomunikačního řetězce, který nám zajišťuje přechod vlny vedené ve vlnovodu na vlny šířené ve volném prostoru. Anténu můžeme chápat jako skupinu elementárních zdrojů s takovým uspořádáním, aby vytvářela požadovaný tvar směrové charakteristiky pro vlnu na určité frekvenci. Anténa mění charakter šíření z šíření ve vlnovodu na šíření v obecném prostoru. Podle směru šíření rádiových vln dělíme antény na vysílací a přijímací. Vysílací anténa mění vlnění podél vedení na vlnění ve volném prostoru. Slouží jako přechodová oblast mezi vedenými a šířenými vlnami. Antény se dělí na antény přijímací a antény vysílací. V principu ale každá anténa může vysílat i přijímat. Vysílací anténa je určena k přeměně elektrické energie na energii elektromagnetických vln. Přijímací anténa je určena k přeměně energie elektromagnetických vln na energii elektrickou. Přijímací a vysílací zároveň. Elektromagnetické vlny vyzařuje každý vodič, kterým prochází střídavý elektrický proud. Anténa je vodič. Je upravena, aby vyzařovala maximální množství elektrické energie. Jako nejjednodušší anténu lze využít syntetický zářič, takzvaný dipól. Dipól vychází z úseku vedení o délce poloviny vlnové délky vysílaného/přijímaného signálu. Vlastnosti popisujeme následujícími parametry:

1) Zisk antény

Zisk nám udává, kolikrát větší výkon poskytuje přijímací anténa buď vůči půl vlnnému dipólu nebo vůči teoreticky dokonalé všesměrové anténě, tzv. izotropnímu zářiči. Jednotkou zisku je 1 decibel. Zkratkou $[dBi]$ se vyjadřuje zisk antény vůči izotropní anténě. $[Dbd]$ označuje zisk v porovnání s půlvlnným dipólem. Častěji se setkáme se značením $[dB]$. Platí, že $dBi = 2,16 + Dbd$ (půlvlnný dipól má zisk 2,16 dB vůči izotropnímu zářiči). Antény typu Yagi mívají zisk 6-16 dB oproti půlvlnnému dipólu. Parabolické antény mívají zisk desítky dB.

2) Šířka pásma

Šířka pásma udává šířku přenášeného frekvenčního pásma. Udává tedy rozdíl mezi nejvyšší a nejnižší frekvencí přenášeného signálu. Vyjadřuje se v Hertzech $[Hz]$.

$$B = f_H - f_L, \quad (4.1)$$

kde f_H udává nejvyšší frekvenci přenášeného signálu a f_L udává nejnižší frekvenci přenášeného signálu.

3) Impedance Z

Impedance antény Z $[\Omega]$ je vlastní impedance, která by měla být reálná (*bez imaginární složky*). Impedance antény musí být přibližně stejná jako impedance přívodního kabelu, aby nedocházelo k odrazům.

4) Polarizace

Polarizace se využívá v TV technice při pozemním vysílání (*horizontální nebo vertikální polarizace*). V satelitní technice se používá kruhová nebo eliptická polarizace (*levotočivá nebo pravotočivá polarizace*).

5) Směrovost

Tento parametr nám určuje směrovost antény. Je to schopnost vyzařovat nebo přijímat elektromagnetické vlny v požadovaném směru. Směrovost můžeme posuzovat dle tzv. vyzařovacích charakteristik. Ty se dále dělí na vertikální a horizontální.

6) Vyzařovací úhel

Vyzařovací úhel antény je úhel, který je dán tzv. směrovým diagramem. Vypočítá se jako rozdíl úhlů bodů, kde je pokles signálu o 3 dB, tedy o polovinu výkonu.

7) Efektivní délka antény

Efektivní délka antény značí takovou délku antény, kterou prochází rovnoměrně rozložený vysílací (příjemací) proud.

8) Činitel zpětného příjmu

Činitel zpětného příjmu vyjadřuje základní směrovost antény. Je to poměr napětí na svorkách antény při příjmu.

9) Součinitel směrovosti D

Součinitel směrovosti D udává, kolikrát musíme zvýšit výkon vysílače při přechodu z měřené antény na anténu referenční, abychom dosáhli v libovolném místě příjmu stejné intenzity EMG .

4.1 Rozdělení antén

Antény dělíme podle uspořádání elementárních zdrojů do tří základních skupin.

- Lineární antény – pro nižší i vyšší frekvence do GHz. Elementárním zdrojem je zde tenký vodič rozložený do různých konfigurací.
- Plošné antény – využívají se především pro centimetrové vlny. Elementárními zdroji jsou Huyghensovy zdroje – elementární plošky. Antény vyzařují z plochého ústí tzv. apertury. Do této oblasti patří antény trychtýřové, šterbinové, reflektorové a antény čočky.
- Magnetické antény – Elementární zdrojem je zde médium, u kterého protéká fiktivní magnetický proud. Patří sem rámové antény a feritové antény.

Podle tvaru dále dělíme antény na:

- Drátové antény
- Plošné antény
- Reflektorové antény
- Anténní čočky
- Anténní řady

a) Drátové antény

Princip je založen na vyzařování vodičů nebo soustav vodičů. Drátové antény se vyznačují převládající délkou antény nad průměrem vodiče.

Tvary drátových antén:

- přímý vodič,
- smyčka (kruhový, pravoúhlý),
- šroubovice.

b) Plošné antény

Plošné antény vyzařují výstupní plochou (aperturou). Apertura může mít tvar vlnovodného ústí, trychtýře nebo štěrbin.

- Štěrbínová anténa – Tento typ antény je tvořen vodivou plochou a štěrbinami vyříznutých v anténě. Štěrbiny bývají pravoúhlé přímé nebo zalomené, skládané, kruhové, vyříznuté ve stěně vlnovodu.

c) Reflektorové antény

Tyto antény jsou tvořeny zářičem (*zdrojem*) a reflektorem (*soustava reflektorů*). Mají za úkol nasměrovat vlny ze zářiče do volného prostoru podle určitých požadavků. Pro tento účel musí mít reflektor speciální tvar (paraboloid). Zářič je umístěn v ohnisku paraboloidu, takže odražené paprsky jsou rovnoběžné. Ve většině případů jsou reflektorové antény úzce směrové. Používají se antény parabolické v průměrech 30, 60, 90, 120 a 180 cm, v závislosti na požadované vzdálenosti přenosu, vysílacím výkonu a dalších parametrech.

d) Anténní čočky

Anténní čočky jsou typem antén s podobnou konstrukcí jako optické čočky.

Můžeme je dělit podle tvaru jejich povrchu na:

- konvexní (dutý)
- rovinný
- konkávní (vypuklý)

Jejich vlastnosti určuje i použitý materiál, charakterizován relativním indexem lomu n . Zářič se umísťuje rovněž do ohniska čočky. Oproti reflektorovým anténám lze konstruovat tyto čočky menší.

e) Anténní řady

Aktivní zářič je u této antény tvořen složeným dipólem. Využívají jako elementární zářiče typy antén, které seskupují do spojitých struktur v řadách (*horizontálně, vertikálně*), plochách, v prostoru a jejich kombinací. Příkladem je Yagiho anténní řada.

5 ANALÝZA CHYBOVOSTI

5.1 Model komunikačního kanálu

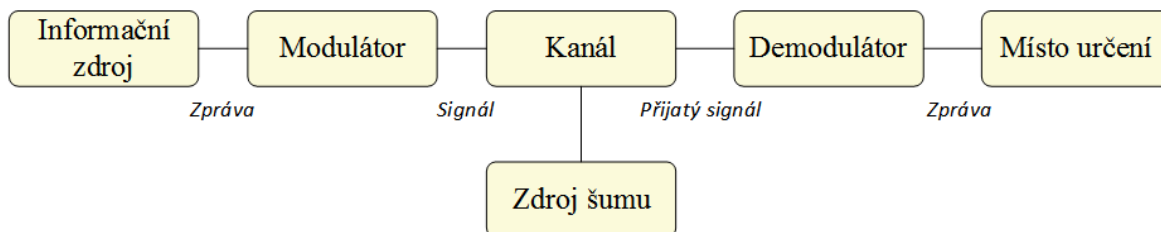
Pro analýzu digitálního přenosu signálu je potřebné stanovit zjednodušený model přenosového řetězce. Při přenosu před vysláním signálu provádíme vhodné kódování k zajištění vhodné úpravy zdrojové informace kompresí a pro účely vlastního přenosu na daném médiu (modulací, zabezpečení proti chybám). V přijímači poté provádíme dekódování této informace. Vlastnosti komunikačního řetězce určují parametry kanálu (B – šířka pásma v Hz, útlum v dB, zkreslení signálu) ovlivňují signál S na vstupu přijímače a šumu N (*noise*). Důležitým parametrem je poměr středního výkonu signálu ke střednímu výkonu šumu SNR (*Signal to Noise Ratio*) a tento poměr je vyjádřen v dB – určující odstup signálu od šumu. Teoretickou informační propustnost můžeme stanovit dle vzorce Shannonova teorému:

$$C_i = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (5.1)$$

,kde B je šířka pásma v Hz, S je střední výkon užitečného signálu na vstupu přijímače a N je střední hodnota výkon šumu v dB.

V důsledku zhoršení vlastností kanálu a zvýšení úrovně šumu dochází k chybnému vyhodnocení symbolů digitálního signálu a dochází tím ke vzniku chyb. Základním kritériem pro hodnocení kvality je chybovost (*četnost chyb*). Pro vyhodnocení kvality přenosu signálu rozeznáváme chybovost:

- Bitová chybovost
- Bajtová chybovost
- Znaková chybovost
- Symbolová chybovost
- Bloková chybovost (*rámcová, paketová*)



Obr. 5.1: Shannonův a Weaverův model komunikačního kanálu

5.2 Definice bitové chybovosti

Chybovost je dána poměrem chybně přenesených bitů elementů digitálního signálu k celkovému počtu přenesených elementů. Bitovou chybovost označujeme zkratkou BER (*Bit Error Rate*). Definici bitové chybovosti lze vyjádřit vztahem:

$$BER = \frac{m_e}{v_t \cdot t_m} \quad (\text{bit/s}) \quad (5.2)$$

,kde m_e je počet chybně přijatých bitů, v_t je přenosová rychlost, t_m je celková doba měření.

Pro spolehlivou komunikaci je vyžadována velice nízká hodnota bitové chybovosti:

- 10^{-3} (*1 chyba z tisíce*) je limitní hodnotou pro provoz linkových systémů PCM pro telefonii.
- 10^{-6} je hodnotou, která se již neprojevuje na kvalitě přenášených hovorů.
- 10^{-7} je hodnotou limitující provoz přípojek xDSL.
- $10^{-10} - 10^{-12}$ jsou hodnoty vyžadované pro optické linkové systémy.

Při přenosu dat kanálem s maximální bitovou chybovostí 10^{-6} bude při délce rámce 1280 bajtů, což je 10^{-4} bitů, v extrémním případě jedna bitová chyba v každém stém rámci. To povede ke ztrátovosti paketů PLR (*Packet Loss Rate*) 1 %, což je relativně vysoká hodnota. Na vznik chyb působí různé faktory. Můžeme jmenovat tepelný šum, který vzniká náhodným tepelným pohybem nabitých částic (*zpravidla elektronů*) v rámci elektrických vodičů a zařízení. Dále šum polovodičových prvků a zesilovačů. U metalických a rádiových přenosů též rušení z energetických rozvodů a interference jiných rádiových systémů. V praxi se chyby vyskytují náhodně a pro zjištění chybovosti je musíme vyhodnocovat dostatečně dlouhou dobu. Bitová chybovost však nevystihuje časové rozložení výskytu chyby. To je důležité zejména při diagnostice digitálních zařízení. Z časového hlediska chyby dělíme na:

- jednotlivé náhodně rozložené chyby,
- ve shlucích, náhodně rozložených,
- ve shlucích pravidelně rozložených – v souvislosti s vnějšími vlivy.

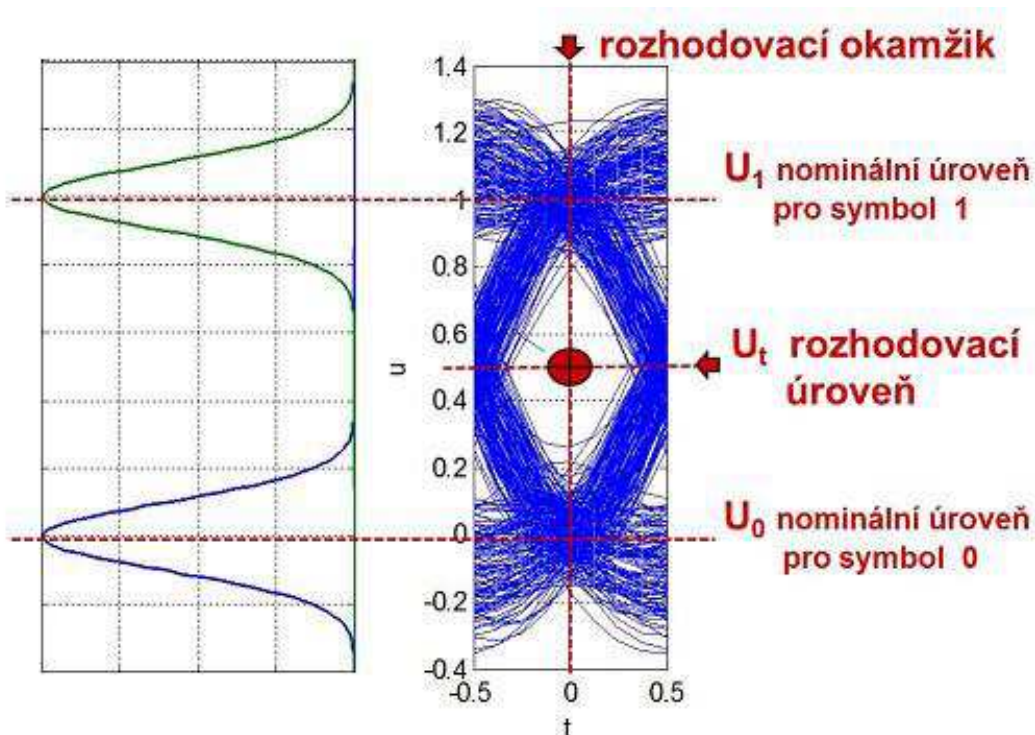
5.3 Regenerace signálu

Zesilovač obsahuje filtr typu dolní propust LP. Zesiluje amplitudu signálu a zároveň provádí omezení spektra pro snížení šumu. Hlavním cílem je korekce a úprava tvaru impulsů tak, aby se minimalizovalo ovlivňování sousedních signálových prvků, tj. aby došlo k omezení mezisymbolové interference (ISI). U vysokorychlostního optického přenosu dochází k uvedenému jevu v důsledku disperze, hovoříme pak o elektronické, příp. optické kompenzaci disperze v přijímači. Rozhodovací obvod obnoví tvar digitálního signálu, který se posílá k dalšímu zpracování. U opakovačů optického signálu předchází na vstupu převod O/E (*z optického na elektrický*) a za výstupním budičem opačný převod E/O (*z elektrického na optický*). Rozhodovací obvod mají za úkol vydělit taktovací složku ze signálu a na jejím základě určit rozhodovací okamžiky pro regeneraci digitálního signálu. Definujeme dva principy rozhodování. V okamžiku, kde jsou pevně stanovené rozhodovací úrovně, označujeme jako tzv. tvrdé rozhodování (*Hard Decision*). Pokud je typicky při dvouúrovňovém digitálním signálu okamžitá hodnota nad rozhodovací úrovní, je vyhodnocen symbol 1, v opačném případě symbol 0. Oproti tomu v moderních komunikačních systémech se používá tzv. měkké rozhodování (*Soft Decision*), při kterém se zpracovává posloupnost vzorků a hledá se za pomoci definované závislosti mezi symboly nejpravděpodobnější podoba originální posloupnosti. Tato metoda umožní bezchybný příjem i při nižších poměrech SNR.

5.4 Rozložení amplitudy symbolů

Pro příklad uvažujme kanál s AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) s dokonale potlačenou mezisymbolovou interferencí (*pomocí vstupního filtru*) a perfektní synchronizací na přijímací straně. V takovém případě budou vznikat chyby pouze v důsledku šumu. Rozložení výskytu přijímaných symbolů v čase můžeme popsat pomocí hustoty pravděpodobnosti PDF (*Probability Density Function*). Při Gaussově (*normálním*) rozložení amplitud (u) v rozhodovacím místě, pro které platí:

$$PDF(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(u-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.3)$$



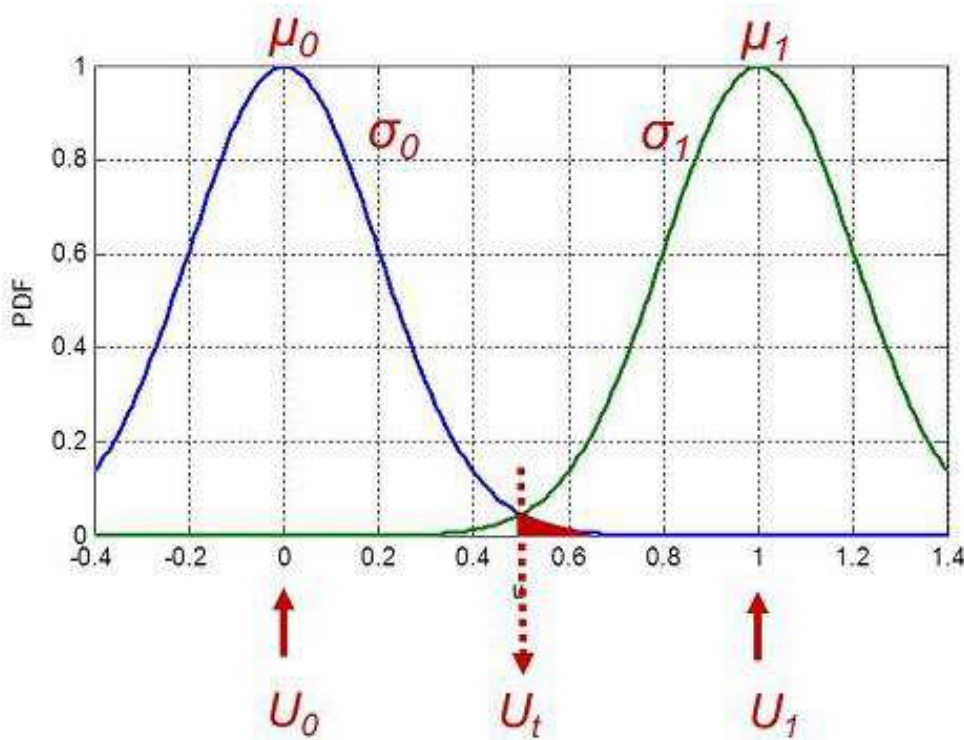
Obr. 5.3: Zobrazení rozložení pravděpodobnosti amplitud

Gaussovské křivky naznačené vlevo od diagramu oka mají následující parametry:

- μ_0 – střední hodnota vyhodnocovaných symbolů pro logickou 0 (U_0).
- μ_1 – střední hodnota vyhodnocovaných symbolů pro logickou 1 (U_1).
- σ_0 – rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů pro logickou 0. Určuje strmost zelené Gaussovské křivky.
- σ_1 – rozptyl hodnot vyhodnocovaných symbolů pro logickou 1. Určuje strmost modré Gaussovské křivky.

5.5 Pravděpodobnost vzniku chyby

Hustotu pravděpodobnosti vyjádřenou pomocí matematického modelu lze využít k výpočtu pravděpodobnosti vzniku chyby.



Obr. 5.4: Hustota pravděpodobnosti amplitud

Pravděpodobnosti vzniku chyby pro symbol (U_0) vypočítáme jako podmíněnou pravděpodobnost. Podmínka je taková, že byl vyslán symbol (U_0). Pravděpodobnost vzniku chyby je úměrná ploše Gaussovy křivky se střední hodnotou 0 nad rozhodovací úrovní (U_t), která je vyznačena červenou plochou v grafu. Teoreticky pokračuje mezi modrou Gaussovou křivkou a osou (u) do nekonečna. Jde o vyslané symboly (U_0) chybně považované za (U_1).

Pravděpodobnost této chyby získáme pomocí integrace funkce PDF:

$$P_{eU_0} = P[U_0; u > U_t] = P[U_0] \cdot P[u > U_t | U_0] = P[U_0] \int_{U_t}^{\infty} PDF(u|U_0) du \quad (5.4)$$

Integrál z Gaussovy hustoty pravděpodobnosti lze vypočítat pomocí tzv. komplementární chybové funkce definované vztahem:

$$erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (5.5)$$

Komplementární chybovou funkci lze nalézt jako standardní funkci ve výpočetních nástrojích, nebo ji můžeme zjednodušeně aproximovat. Předpokládáme stejnou pravděpodobnost výskytu symbolů hodnoty logické 0 a 1 a také stejné rozptyly hodnot v místě rozhodnutí pro 0 a 1. Střední výkon signálu je úměrný druhé mocnině rozhodovací úrovně, která leží právě v polovině mezi středními hodnotami symbolů 0 a 1. Střední výkon šumu odpovídá druhé mocnině rozptylu. Poměr středního výkonu signálu ke střednímu výkonu šumu $(U_t/\sigma)^2$ je poměrem SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Závislost mezi pravděpodobností chyby symbolu (*odpovídá pravděpodobnosti bitové chyby*) a poměrem SNR lze vyjádřit pro přenos dvouúrovňovým kódem pomocí vztahu:

$$P_{se} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{SNR}{2}} \quad (5.6)$$

V případě více úrovní signálu vzniká více ok rozhodnutí (*v počtu $M-1$*). S narůstajícím šumem nám klesá hodnota SNR, oko se „uzavírá“ a roste pravděpodobnost vzniku chyby. Vznik chyb lze analyzovat na diagramu oka. Při Gaussově rozložení šumu lze vypočítat pravděpodobnost vzniku chyby na základě poměru SNR pomocí komplementární chybové funkce. Požadovanou dostatečně nízkou chybovost lze zajistit za předpokladu optimální korekce přijímaných symbolů (*potlačení mezisymbolové interference*) a synchronizace:

- Dostatečně vysokou rezervou SNR tak, aby nedocházelo k chybnému vyhodnocení symbolů.
- Korekčním kódem, který zajistí opravu vzniklých chyb.

Prakticky využitelná přenosová rychlost bude vždy nižší oproti teoretické z důvodů:

- Zajištění nutné rezervy ve výkonu signálu pro dodržení požadované četnosti vzniku chyb. Na druhé straně se započítává kódový zisk.
- Zajištění rezervy v šířce pásma – modulační rychlost musí být prakticky nižší než šířka pásma.
- Prakticky použité počty stavů jsou v mocninách 2 pro snadnou reprezentaci binárních dat.

5.6 Pravděpodobnost vzniku chyby pro víceúrovňové kódy

Pro víceúrovňové kódy s počtem úrovní M dostáváme obecný vztah:

$$P_{se} = \left(1 - \frac{1}{M}\right) \cdot \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{3 \times SNR}{2 \times (M^2 - 1)}} \quad (5.7)$$

Pro odhad četnosti chyb v přijatých bitech vycházíme z předpokladu, že nejbližší sousední symboly se liší jediným bitem a dále uvažujeme pouze nejpravděpodobnější možnost záměny za sousední symboly. Pak chyba v jednom symbolu odpovídá maximálně chybě v jednom bitu a pro bitovou chybovost platí:

$$BER \approx P_{se} \approx \frac{1}{\log_2 M} \quad (5.8)$$

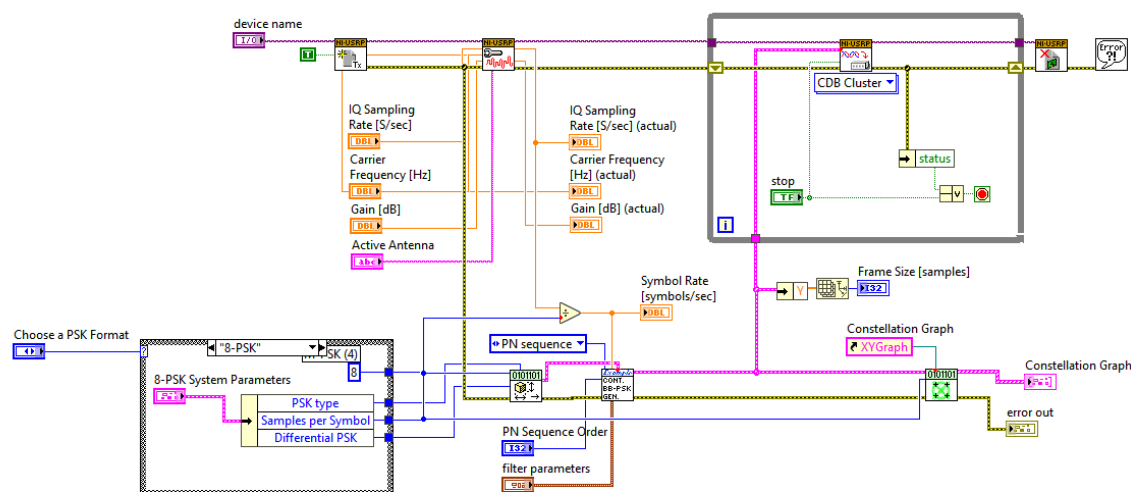
S narůstajícím počtem úrovní linkového kódu narůstá pro požadovanou minimální chybovost nárok na dodržení poměru SNR. Nárůst dvojnásobku počtu úrovní vyžaduje zvýšení SNR cca o 6 dB.

6 NÁVRH ŘEŠENÍ VZESTUPNÉ RF KOMUNIKACE

Pro vlastní měření jsem použil softwaru NI LabVIEW 2016 pro grafický návrh systémů ve verzi Professional Development System. Data jsem zpracoval v laboratoři signálů a soustav v laboratoři EB205 na FEI VŠB-TU Ostrava.

6.1 Modulátor signálu PSK

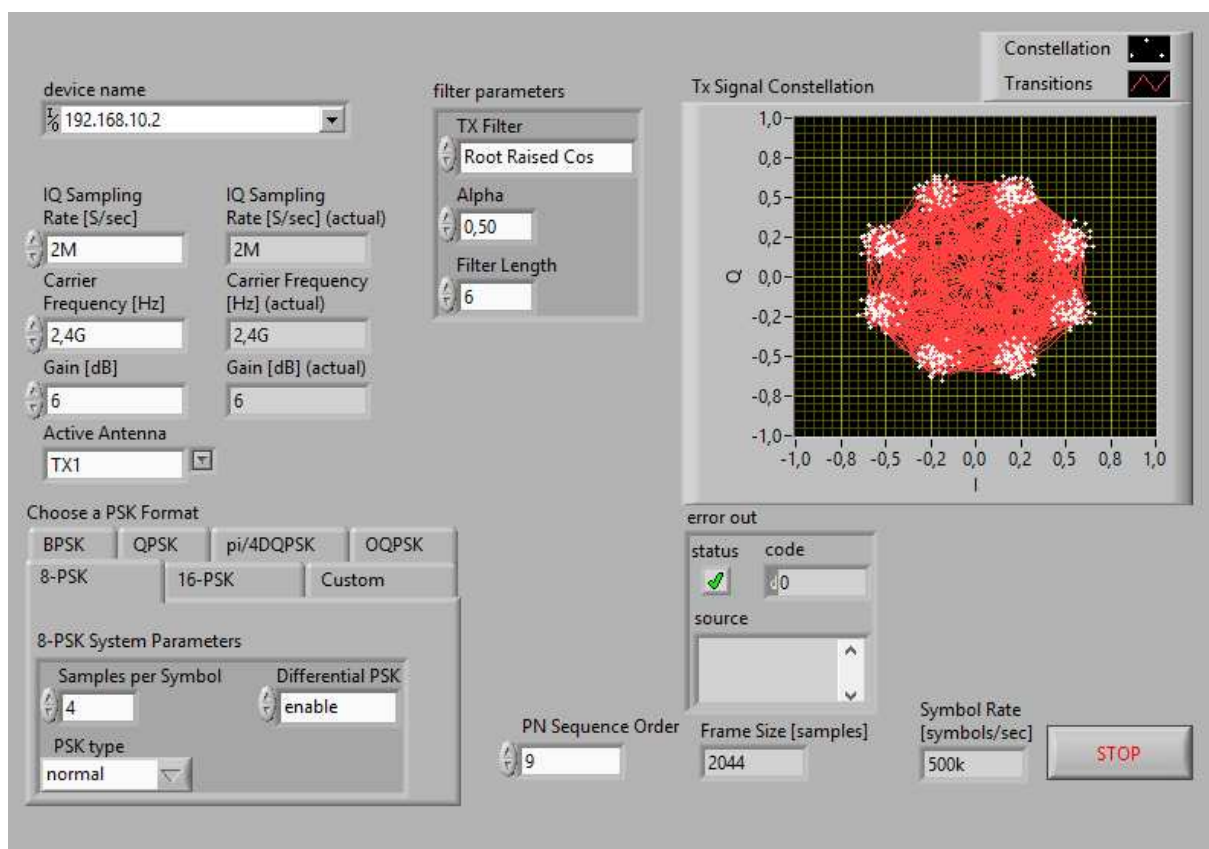
Nejprve bylo nutné vytvořit modulátor signálu PSK. Souběžně s návrhem blokového diagramu se vytváří i grafické rozhraní pro uživatele (*GUI*). Jednotlivé bloky teď rozepíšu detailněji. Blok „*device name*“ definuje použitou IP adresu zařízení v síti. Jelikož oba signálové analyzátoři USRP 2921 byly připojeny k PC pomocí ethernetového kabelu, synchronizace mohla probíhat pomocí IP adres v síti. Sítové adresy jsem definoval v ovladači zařízení USRP a také přímo v aplikačním rozhraní modulátoru a demodulátoru signálu v softwaru LabVIEW. Použil jsem IP adresu 192.168.10.2 pro modulátor a 192.168.10.3 pro demodulátor. Zařízení byly mezi sebou párovány pomocí těchto IP adres. V bloku „*device name*“ jsem nadefinoval IP adresu zařízení. V bloku „*USRP*“ je dále nutné specifikovat šířku pásma, nosnou frekvenci, zisk a aktivní použitou anténu. Já jsem moduloval signál pomocí úzkopásmového modulačního schéma 8-DPSK s použitou šířkou pásma 2 MHz na nosné rádiové vlně 2,4 GHz.



Obr. 6.1: Blokový diagram modulátoru PSK

Využil jsem šířku pásma 2 MHz v dostupném bezlicenčním ISM pásmu (*Industrial, Scientific and Medical*) v rozmezí 2,4-2,48 GHz. S rostoucí šířkou pásma roste i přenosová rychlost. Při použití dvojnásobné šířky pásma jsme schopni docílit dvojnásobné přenosové rychlosti při zachování stejné modulační techniky. Šířka využitelného pásma pro Bluetooth v Evropě a ve většině ostatních zemí je 2400–2483,5 MHz. Bylo nutné nastavit nosnou frekvenci. Pro experimentální účely byla nastavena na rovných 2,4 GHz. V bezlicenčním ISM pásmu je tedy k dispozici 79 rádiových kanálů rozdělených do 1 MHz pásem. Technologie BLE využívá 40 rádiových kanálů rozdělených do 2 MHz pásem. Já jsem využil širšího pásma, s kterým jsem schopen při stejné modulační technice navýšit přenosovou rychlost. Dále bylo nutné nastavit zisk vysílače a přijímače na ideální úroveň signálu pro měření bitové chybovosti BER. Ten jsem s ohledem na omezený rozsah měření v laboratoři nastavil na 6 dB tak, abych

získal co nejpřesnější průběh signálu zaneseného chybou pro výpočet hodnoty BER. Zisk byl tedy nastaven a dále bylo nutné v softwaru přiřadit aktivní anténu pro vysílání a příjem signálu. Měl jsem k dispozici dvě antény – obě byly všesměrové. Obě externí antény lze použít pro technologii Wi-Fi i Bluetooth pro příjem i vysílání RF signálu. Obě technologie pracují v bezlicenčním ISM pásmu 2,4–2,48 GHz. Aktivní anténu jsem vybral externí všesměrovou, kterou jsem měl k dispozici v laboratoři. Antény jsem připojil na vstup USRP 2921 vektorového síťového generátoru a USRP 2921 vektorového síťového analyzátoru. Při nastavené IP adrese zařízení USRP, šířce pásma, frekvence nosného signálu a zisku antén, jsem byl schopen dále pokračovat v nastavení modulačního formátu. Využil jsem modulační schéma 8-DPSK pro vyšší přenosovou rychlost 6 Mbit/s a modulační schéma $\pi/4$ DQPSK pro nižší přenosovou rychlost 4 Mbit/s s použitou šířkou pásma 2 MHz.

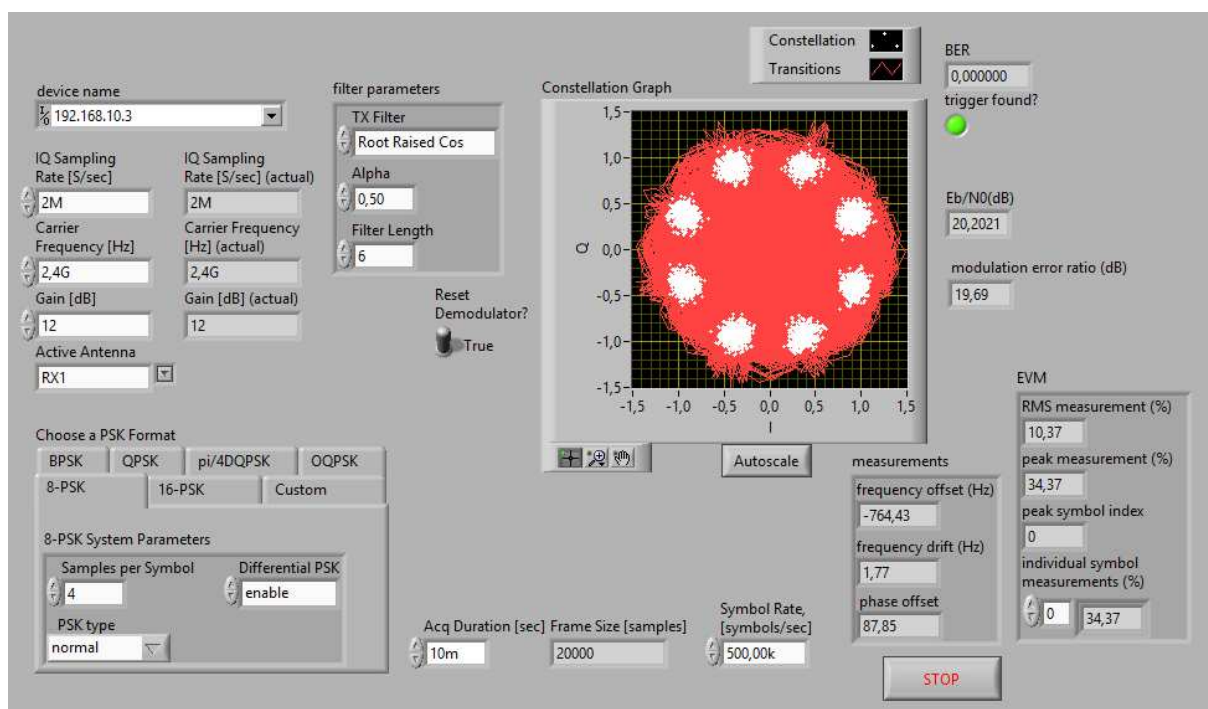


Obr. 6.2: Grafické rozhraní modulátoru v softwaru LabVIEW 2016

Dále bylo nutné nastavit diferenciální klíčování. Diferenciální klíčování se nastavuje z důvodu nepotřebnosti mít u demodulačního zařízení k dispozici přesnou kopii referenčního signálu. Nemusíme udržovat přesnou kopii referenční nosné vlny, místo toho si vystačíme pouze se změnou fáze přijímaného signálu. Nevýhodou je, že častěji dochází k chybné modulaci. Dále jsem nastavil parametry filtrů na vysílací straně. Použil jsem filtr „Root Raised Cos“, se kterými jsem dosahoval nejlepších parametrů. Alpha je nastavena defaultně na hodnotu 0,5. Délka filtru rovněž nastavena defaultně na hodnotu 6. Posledním krokem nastavení modulátoru bylo nastavit PN sekvenci. Tu jsem nastavil na hodnotu 9 se 2044 samplly.

6.2 Demodulátor signálu PSK

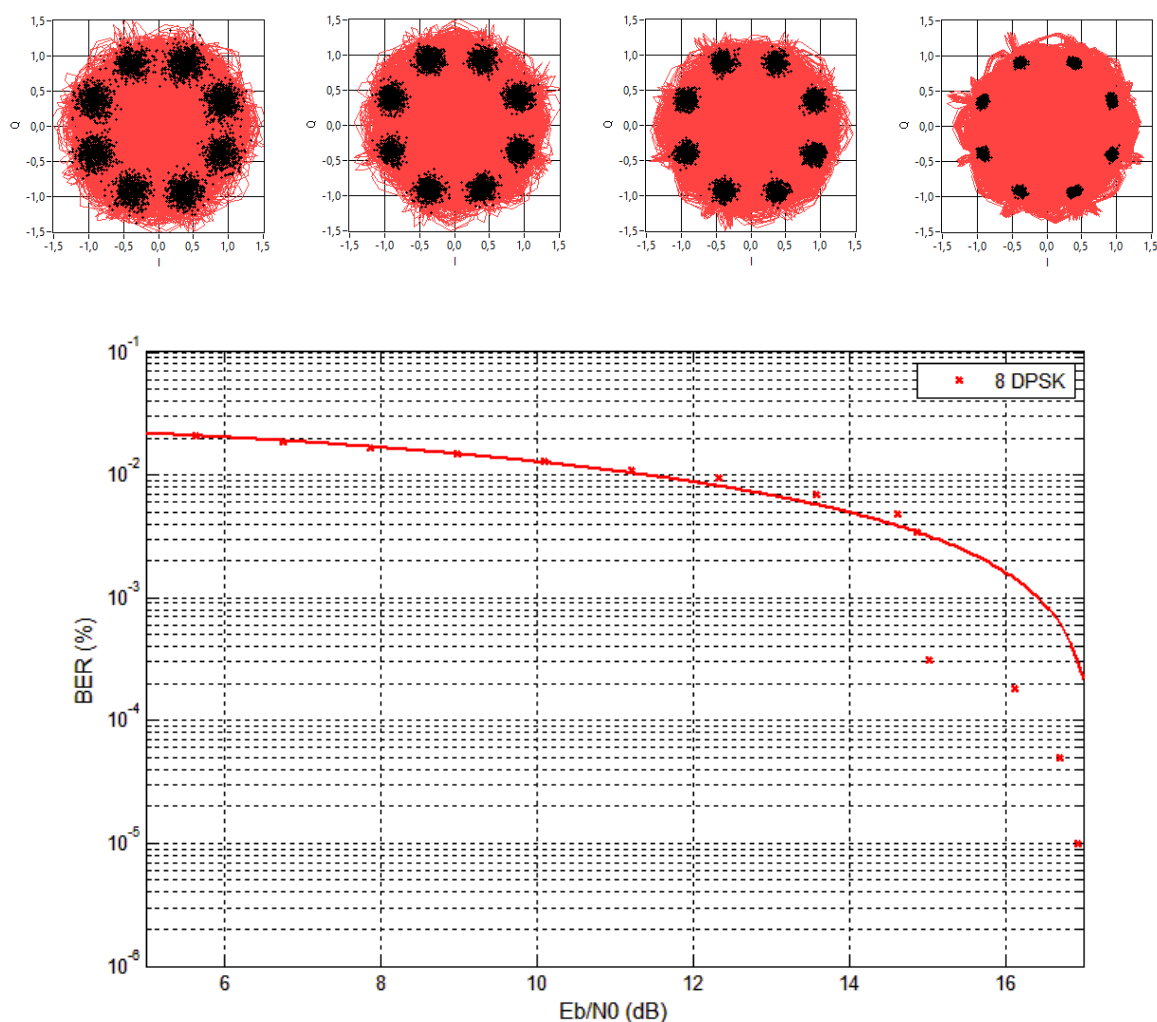
Pro příjem signálu bylo nutné vytvořit demodulátor. V první řadě byla nutná synchronizace mezi síťovým analyzátozem USRP 2921. V ovladači USRP jsem napevno nastavil IP adresu pro vysílací stranu 192.168.10.2 a IP adresu pro přijímací stranu 192.168.10.3. USRP byly připojeny k PC pomocí ethernetového kabelu. K USRP byla připojena dvojice externích všesměrových antén. Bylo nutné nastavit šířku pásma odpovídající modulovanému signálu v pásmu 2 MHz. Stejně parametry jsem nastavil na vysílací straně. Dále bylo nutné nastavit nosnou frekvenci signálu na stejnou frekvenci. Pro měření jsem nastavil frekvenci 2,4 GHz. Zisk antén jsem nastavoval v rozmezí 0-12 dB, ale pro vlastní měření jsem použil hodnotu 6 dB. Využil jsem externí všesměrovou anténu. Dále bylo nutné nastavit parametry modulačního schématu 8-DPSK. Bylo nutné zapnout diferenciální klíčování. Typ PSK modulace byl nastaven na standardní hodnotu bez fázového posunutí. Parametry filtru jsem nastavil obdobně jako u modulátoru. Byl použit filtr „Root Raised Cos“, který nabízel nejlepší výsledky z měření. Alpha tvarovacího filtru byla nastavena defaultně také na hodnotu 0,5. Délka filtru byla nastavena na hodnotě 6. Zde jsem již byl schopen vytvořit RF datovou komunikaci s modulací 8-DPSK a přenosovou rychlostí 6 Mbit/s.



Obr. 6.3: Grafické rozhraní demodulátoru v softwaru LabVIEW 2016

6.3 Měření 8-DPSK

Měřil jsem modulační schéma 8-DPSK na vzdálenost 0–5 metrů. Pro měření jsem využil softwaru LabVIEW 2016. Bylo nutné synchronizovat USRP vektorový signálový generátor a USRP vektorový signálový analyzátor. Po synchronizaci jsem mohl postupovat k vlastnímu řešení. Datovou komunikaci jsem vytvořil pomocí softwarového modulátoru a demodulátoru PSK signálu v softwaru LabVIEW a USRP 2921 vektorového signálového generátoru a USRP 2921 vektorového signálového analyzátoru. Pro měření všech parametrů bylo nutné implementovat parametry BER, E_b/N_0 , EVM. Řešení bylo implementováno pomocí bloku v blokovém schématu softwaru. Po implementaci parametrů nutných pro vlastní měření jsem mohl začít měřit a analyzovat signál. V první řadě bylo nutné spustit modulátor na vysílací straně, který vysílal modulovaný signál na nosné frekvenci 2,4 GHz s šířkou modulovaného pásma 2 MHz. Poté jsem spustil demodulátor na přijímací straně. Po správném nastavení se vytvořila bezdrátová datová komunikace v RF spektru. Vysílal jsem pomocí dvojice externích antén na nosné rádiové vlně 2,4 GHz.

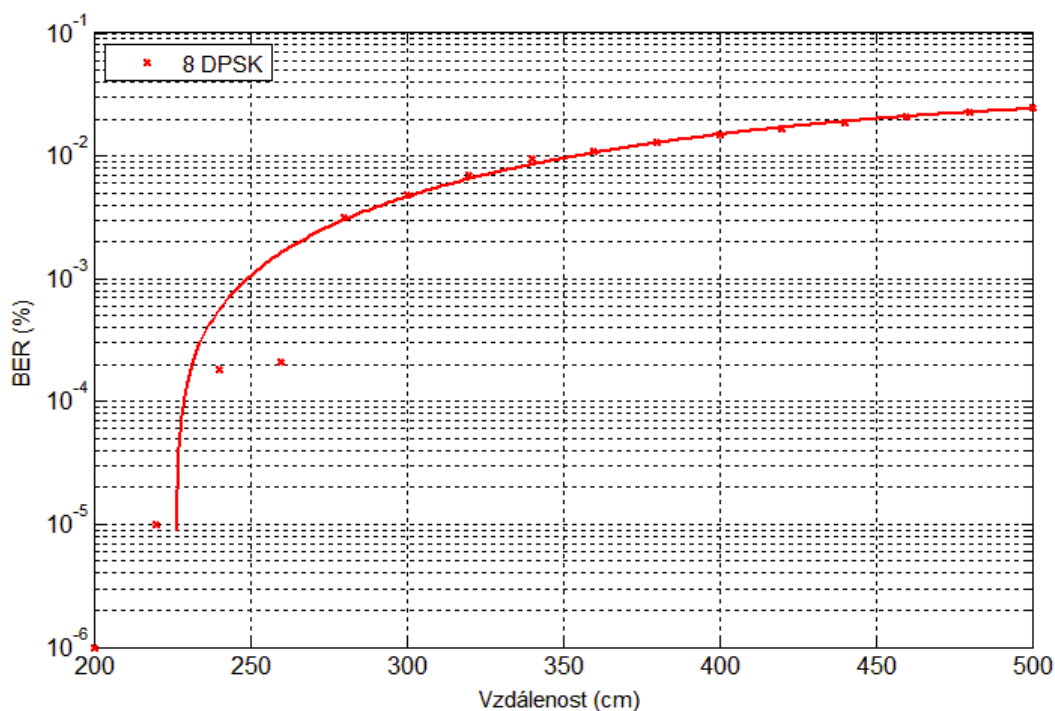


Obr. 6.6: BER versus E_b/N_0

Z naměřených hodnot si můžeme všimnout přímé závislosti BER a E_b/N_0 . S rostoucím odstupem E_b/N_0 klesala bitová chybovost BER. Při modulaci 8-DPSK jsem měl problém navázat komunikaci již při hodnotě 15 E_b/N_0 . Při E_b/N_0 18,5 dB se začala projevovat bitová chybovost v řádu 10^{-6} . Bitová chybovost BER dále klesala až k hodnotám BER 10^{-1} při velmi malém odstupu E_b/N_0 6 dB a méně. Z grafu je tedy patrná závislost E_b/N_0 na hodnotě BER. Modulace 8-DPSK měla vyšší chybovost než modulace $\pi/4$ DQPSK. Je to kvůli použití vyššího počtu stavů modulace signálu. Obecně jsou modulace s vyšším počtem stavů náchylnější k rušení a vykazují vyšší bitovou chybovost BER. Jednotlivé symboly modulace 8-DPSK prochází středem, což se přímo projevuje na dynamice kolísání úrovně signálu. Jednotlivé hodnoty byly určeny střední hodnotou z měření. Každé měření probíhalo desetkrát. Následně byl stanoven rozptyl a směrodatná odchylka pro přesnější měření. Hodnotu BER nebylo možné měřit v řádu 10^{-6} . Bitová chybovost se projevovala až při E_b/N_0 18 dB v řádu 10^{-4} . Je to důsledek nižšího počtu analyzovaných vzorků modulace. Při větším počtu by nám přetekl buffer operační paměti a program by skončil chybovým hlášením. Pro lepší výpočty by bylo nutné navýšit počet vzorků a využít lepších výpočetních zdrojů. Lepší odstup E_b/N_0 by bylo možné vyřešit samoopravnými kódy. Ty by nám měli zlepšit hodnotu E_b/N_0 o cca 2-3 dB. Námět pro další měření by bylo aplikovat tyto detekční a samoopravné kódy na modulaci 8-DPSK ke zlepšení hodnot parametrů a ke snížení bitové chybovosti BER na odstup E_b/N_0 .

Pro vytvoření konstelace PSK lze použít i vyšší počet fází, ale 8-PSK je zpravidla PSK s nejvyšším počtem používaných fází. Při použití většího počtu než 8 fází je chybovost příliš vysoká a existují lepší metody, sice složitější modulace jako je kvadraturní amplitudová modulace (QAM). Přestože počet fází může být libovolný, díky tomu, že se PSK používá pro přenos binárních dat, počet fází musí být roven mocninou čísla 2, což umožňuje používat stejný počet bitů na symbol. Při měření závislosti BER a vzdálenosti jsem musel nastavit ideální úroveň zisku signálu. Při vysokém zisku bych nebyl schopen neměřit hodnoty BER pro jednu místnost. Musel jsem nastavit zisk antén na úroveň 6 dB na vysílací straně modulátoru. Bitová chybovost se začala projevovat při modulaci 8-DPSK již při vzdálenosti 220 cm od vysílací antény. Po vzdálenosti 220 cm se bitová chybovost BER začala zvyšovat až k neakceptovatelným hodnotám při vyšší vzdálenosti. Ideální průběh BER byl v rozmezí 0–220 cm, kdy se bitová chybovost BER držela v řádu do 10^{-6} . Ideální návrh vzestupného kanálu by tedy byl následující. Byla by použita modulační technika 8-DPSK s nastavením zisku vysílací antény 6 dB. Byla by použita směrová anténa vysílající nosnou rádiovou vlnu na frekvenci 2,4 GHz s šířkou pásma 2 MHz v rozmezí ISM.

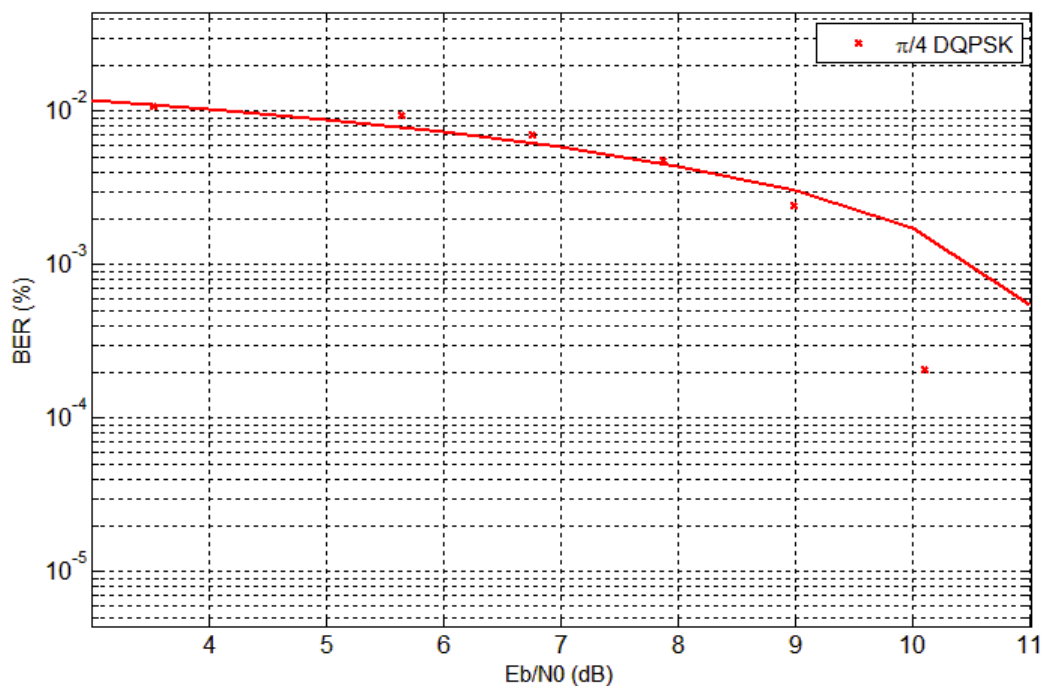
Bitová chybovost při vysílání datové komunikace by byla dle standardu nižší než 10^{-6} ve vzdálenosti datové komunikace mezi 0–220 cm od vysílače signálu. Při tak nízké bitové chybovosti jsme schopni komunikovat v přenosovém pásmu 2 MHz s přenosovou rychlostí až teoretických 6 Mbit/s. Při porušení standardu bitové chybovosti 10^{-6} by při 220 cm by došlo k přepnutí na modulační techniku s menším počtem stavů. Například použité modulační schéma $\pi/4$ -DQPSK, které by nám poskytovalo větší odstup E_b/N_0 při stejné vzdálenosti od vysílací antény. Při větší vzdálenosti by proběhl pokles přenosové rychlosti z 6 Mbit/s na přenosovou rychlost 2 Mbit/s při vzdálenosti vysílače od přijímače vyšší než 220 cm. Byla by zachována stejná kvalita bitové chybovosti BER 10^{-6} a vyšší odstup E_b/N_0 . Použilo by se jednodušší modulační schéma $\pi/4$ -DQPSK, které je čtyřstavové a nabízí tedy vyšší odstup E_b/N_0 , menší chybovost, ale také nižší přenosovou rychlost. Přenosová rychlost 2 Mbit/s by byla dostačující pro vzestupný kanál ve vzdálenosti 220-500 cm. Tato realizace by byla ideální i z pohledu energetické náročnosti na datovou komunikaci v pásmu ISM. Pro vyšší přenosové rychlosti by bylo nutné navýšit buď počet stavů modulace nebo zvýšit šířku pásma signálu. Druhá varianta realizace vzestupného kanálu pro zachování modulačního schéma 8-DPSK by spočívala v automatizaci dynamického přidělování zisku antén. Automatizace by probíhala přímo v aplikačním prostředí softwaru LabVIEW. Anténa by s ohledem na snižující E_b/N_0 dynamicky zvyšovala zisk antény. Při této realizaci by bylo možné datově komunikovat na mnohem větší vzdálenost s použitím stejného modulačního schématu a bitové chybovosti udržené do rozumných hodnot BER 10^{-6} . Modulace vyšších řádů tedy vykazují vyšší bitovou chybovost BER, ale poskytují i vyšší teoretickou přenosovou rychlost.



Obr. 6.8: BER versus vzdálenost

6.4 Měření $\pi/4$ DQPSK

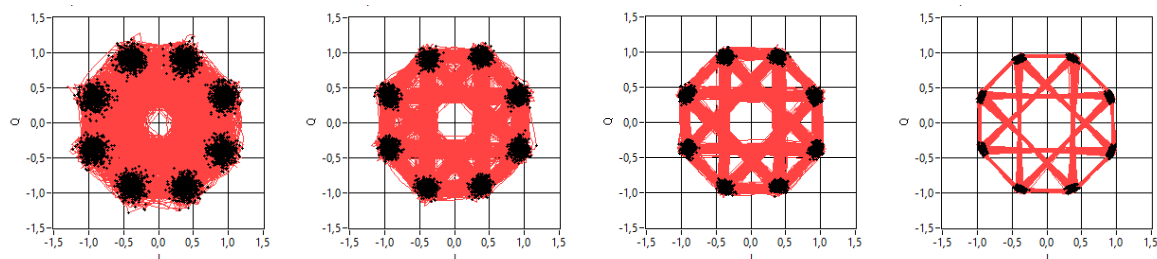
Měřil jsem modulační schéma čtyřstavové modulace na vzdálenost 0-6 m. Pro měření jsem využil softwaru LabVIEW 2016. Bylo nutné synchronizovat USRP vektorový signálový generátor a USRP vektorový signálový analyzátor. Po synchronizaci jsem mohl postupovat k vlastnímu řešení. Datovou komunikaci jsem zprovoznil pomocí softwarového modulátoru a demodulátoru PSK signálu v softwaru LabVIEW a USRP 2921 vektorového signálového generátoru a USRP 2921 vektorového signálového analyzátoru. Pro měření všech parametrů bylo nutné implementovat parametry BER, E_b/N_0 , MER. Při měření bitové chybovosti BER a odstupu E_b/N_0 jsem použil modulační schéma $\pi/4$ DQPSK. Modulace nabývá čtyř fázových stavů, ale nabízí i lepší charakteristiku signálu. Varianta QPSK používá dvě identické konstelace, které jsou vůči sobě pootočené o 45° ($\pi/4$ radiánů). Obvykle jsou buď sudé nebo liché symboly používané pro výběr bodů z jedné konstelace a další symboly pro výběr bodů z druhé konstelace. Jedná se v podstatě o dva konstelační diagramy posazené na sobě. Tím se zmenší maximální posuv fáze ze 180° na 135° , což zmenší i fluktuaci amplitudy, která u $\pi/4$ QPSK se nachází mezi OQPSK a neofsetovým QPSK. Jednou z vlastností tohoto modulačního schématu je, že v případě, kdy modulovaný signál je reprezentován v komplexním oboru, žádné změny neprochází počátkem souřadného systému, a tedy ani rádiový signál nebude procházet počátkem.



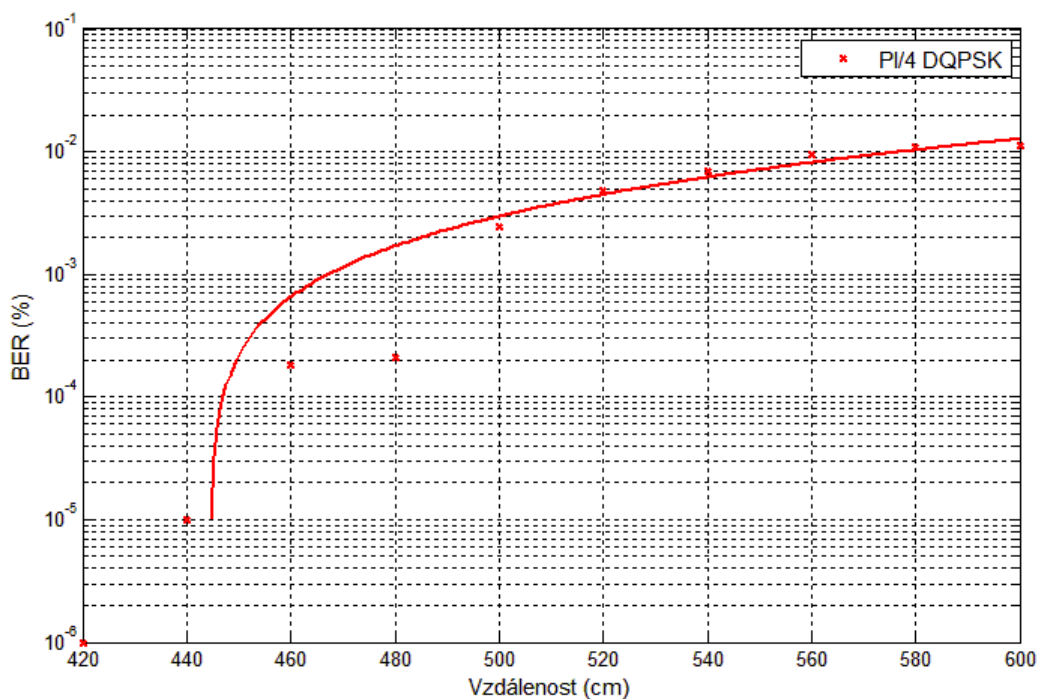
Obr. 6.9: BER versus E_b/N_0

To nám sníží dynamické kolísání signálu, což je v praxi žádoucí. Modulace je přitom poměrně snadná, díky čemuž se metoda používá v systému mobilních telefonů u TDMA. Mým úkolem bylo proměřit závislost bitové chybovosti BER a odstupu E_b/N_0 . Závislost si můžete prohlédnout z grafu 6.8 a grafu 6.9. Při narůstající hodnotě E_b/N_0 nám klesala bitová chybovost BER. Bitová chybovost byla měřitelná až od nižších hodnot E_b/N_0 . To je dáno právě nižším počtem fází potřebné k modulaci signálu. Bitová chybovost se začala projevovat až u velmi nízkého odstupu E_b/N_0 kolem 11 dB. Při nižších hodnotách nám prudce rostla bitová chybovost BER. V závislosti na modulačním schématu 8-DPSK můžeme říci, že bitová chybovost se projevovala až při nižších hodnotách E_b/N_0 . Modulovaný signál je robustnější a odolnější na atmosférické vlivy, než je tomu tak u 8-DPSK modulačního schématu, u kterého se bitová chybovost BER začala projevovat již při 18 dB. Návrh vzestupného kanálu by tedy byl následující. Pro větší odstup E_b/N_0 by bylo možné využití vícecestavové modulační techniky 8-DPSK, která nám nabízí vyšší přenosovou rychlost. Modulační technika 8-DPSK je však náchylnější k atmosférickým vlivům a rušení. Při nižším odstupu E_b/N_0 by proběhlo přepnutí na fyzické vrstvě, které by použila modulační techniku s nižším počtem stavů, např. výše zmíněný $\pi/4$ -DQPSK, která nabízí ovšem nižší přenosovou rychlost, avšak signál je robustnější, odolnější k vnějším vlivům a rušení a nabízí tedy nižší bitovou chybovost v závislosti na odstupu E_b/N_0 . Z uvedeného grafu si můžeme všimnout přímé závislosti na bitové chybovosti BER a vzdálenosti. S narůstající vzdáleností vysílače od přijímače nám roste i bitová chybovost BER. Při použité modulační technice $\pi/4$ -DQPSK se začíná bitová chybovost projevovat při vzdálenosti 440 cm, což je dvojnásobná hodnota oproti modulaci 8-DPSK, kde se bitová chybovost začala projevovat již při 220 cm. Je to dáno jednodušší formou modulace signálu. Signál je robustnější a odolnější vůči vnějším vlivům a rušení. Díky této charakteristice můžeme komunikovat na dvojnásobnou vzdálenost se zachováním stejné hodnoty BER. Při vzdálenosti nad 440 cm se začíná projevovat bitová chybovost analyzována v demodulátoru. Hodnoty prudce vzrůstají až k hodnotám BER v řádu 10^{-1} na vzdálenost cca 6 metrů. Ideální návrh vzestupné části je následující.

Pro datovou komunikaci na menší vzdálenost (*vzdálenost do 220 cm vysílače od přijímače*), při zachování stejné hodnoty BER, by bylo použito složitější modulační schéma s vyšším počtem stavů fáze. Modulace by nabízela vyšší přenosovou rychlost. Pro datovou komunikaci na vyšší vzdálenosti by bylo připraveno jednodušší modulační schéma s méně použitými stavy změny fáze signálu, který nám poskytuje lepší robustnost a odolnost vůči vnějšímu rušení, okolnímu prostředí a elektromagnetickým vlivům. Přenosová rychlost datové komunikace by se snížila z 6 Mbit/s na hodnotu 2 Mbit/s. Signál by byl stabilnější a poskytoval by lepších parametrů BER a EVM.



Obr. 6.9: E_b/N_0 8, 12, 16, 20 dB



Obr. 6.10: BER versus vzdálenost

7 NÁVRH ŘEŠENÍ VZESTUPNÉ IR KOMUNIKACE

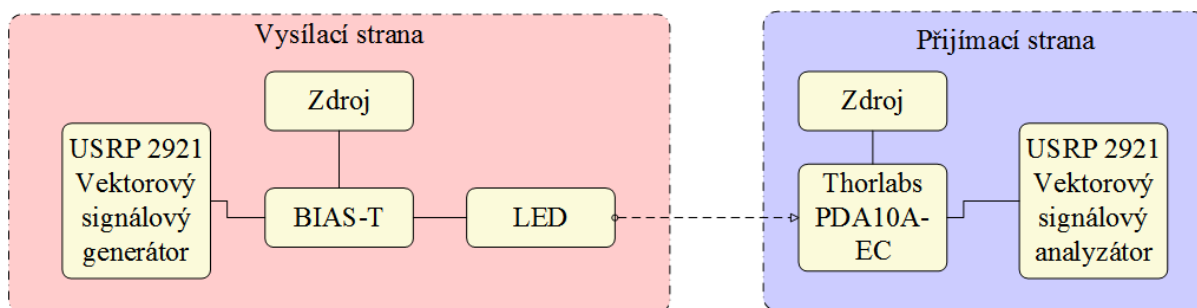
V následujících podkapitolách uvedu výsledky z provedení sady ověřovacích reálných měření modulace 16-QAM (*EVM versus vzdálenost*). Tyto modulační schémata jsou zkoumány na chování BER a EVM. Demodulátor a modulátor QAM signálu je vytvořen v prostředí softwaru LabVIEW 2016. Byl použit vektorový signálový generátor USRP 2921 a signálový vektorový analyzátor USRP 2921. Díky USRP bylo možné nasazení v reálném prostředí. Byly použity dvě USRP zařízení. První sloužilo jako modulátor a druhé jako demodulátor k vyhodnocení demodulovaného signálu a analýze.

7.1 Modulace a demodulace

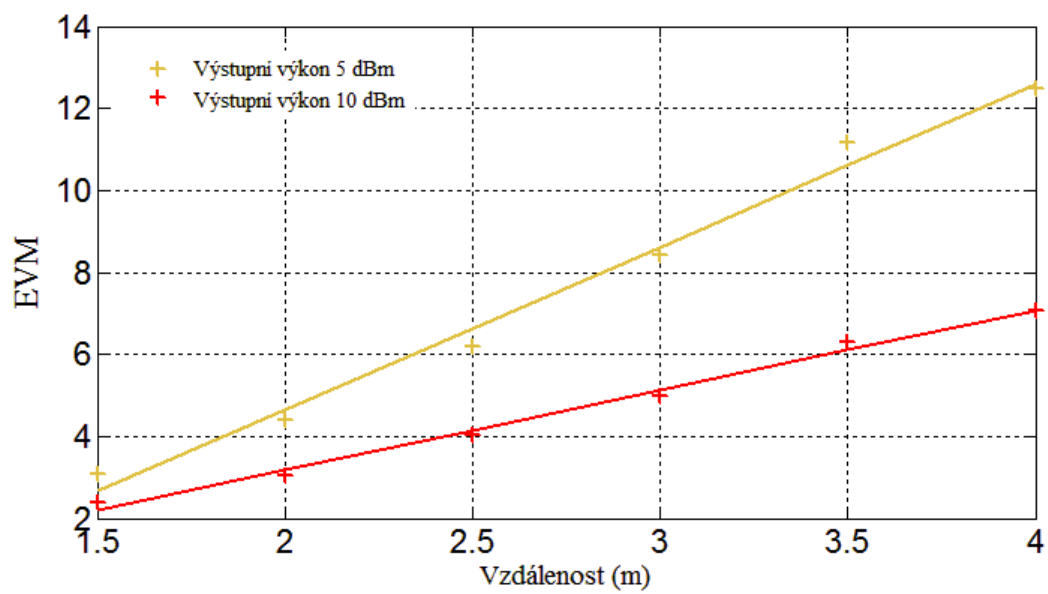
Modulovaný signál byl tvořen pomocí vektorového signálového generátoru USRP 2921. Jedná se o vektorový signálový generátor a analyzátor, který je řízen pomocí aplikace s GUI rozhraním v LabVIEW. Za pomoci softwaru pro tvorbu modulace a demodulace signálu 16-QAM. Pro jejich funkčnost je nutné nainstalovat software LabVIEW ve verzi 14 a vyšší, Modulation Toolkit a ovladače USRP zařízení. Na obrázku je zobrazen čelní panel GUI softwaru LabVIEW. Na levé straně jsou parametry, která nám slouží pro nastavení USRP generátoru. Připojení je nutné nakonfigurovat na síťové kartě. Karta musí splňovat normu Gigabit Ethernet. IP adresy mohou být v rozsahu 192.168.10.0/24. Dále využijeme ovladače NI-USRP. Zjistíme si IP adresy USRP zařízení, které budeme potřebovat před spuštěním kódu. Nastavením nosné frekvence, kterou požadujeme, tedy 2,4 GHz. Dále je nutné nastavit zisk vysílače. Nesmíme zapomenout na nastavení symbolové rychlosti („*Symbol Rate*“), s kterou chceme pracovat. Od symbolové rychlosti se bude odvíjet i výsledná přenosová rychlost. Symbolovou rychlost vynásobíme množstvím bitů tvořících jeden symbol a dostaneme přenosovou rychlost. Pro příklad uvedu 8 stavovou modulaci. 8 stavová modulace je tvořena 3 bity na symbol. Při vynásobení symbolové rychlosti a 3 bity na symbol zjistíme, že přenosová rychlost je trojnásobná oproti symbolové (*modulační*) rychlosti. Při 4 stavové modulaci máme použity 2 bity na symbol. Proto má 4 stavová modulace dvojnásobnou přenosovou rychlost versus rychlost modulační. Dvoustavové modulace mají pouze jeden bit na symbol. Proto výsledná přenosová rychlost je stejná, popř. menší než rychlost modulační. V případě 16-QAM se jedná o 16 stavovou modulaci. Nastavil jsem také tvarovací filtr. Před spuštěním je nutné vybrat z nabídky požadovaný typ modulace. Poté můžeme spustit modulátor. Při správném nastavení modátoru bude indikátor zobrazovat stav generace signálu. Demodulátor se nastavuje obdobně. Do pole umístíme IP adresu USRP vektorového signálového analyzátoru, který má být použit jako demodulátor. Nastavením nosné frekvence, symbolové rychlosti i správným nastavením tvarovacího filtru docílíme kvalitního datového přenosu. Hodnoty musí být nastaveny přesně podle modulačního zařízení. Konstelační diagram je možné vyexportovat kliknutím pravého tlačítka myši. Modulátor ovládá laserové diody, které jsou umístěny v aktivním chladiči. Na straně demodulátoru je fotodetektor Thorlabs, ze kterého byl přiváděn signál do USRP 2921 vektorového signálového analyzátoru. Signál byl následně demodulován a v aplikaci jej bylo možné analyzovat. Princip analýzy výsledného demodulovaného signálu byl následovný. Z hodnot byla určena střední hodnota BER a EVM. V grafu jsem naznačil závislost BER versus vzdálenost a EVM versus vzdálenost. Hodnota BER se zvyšovala se snižujícím odstupem E_b/N_0 a s narůstající vzdáleností mezi vysílačem a přijímačem. Hodnota EVM rostla se zvyšující se vzdáleností. Ideální hodnoty se projevovaly v rozmezí 2-4 % EVM do vzdálenosti 2,5 metru přijímače od vysílače. Jednotlivé konstelační diagramy pro každou úroveň signálu jsou zaznamenány v grafu níže v závislosti na rostoucí vzdálenosti přijímače od vysílače.

7.2 Měření

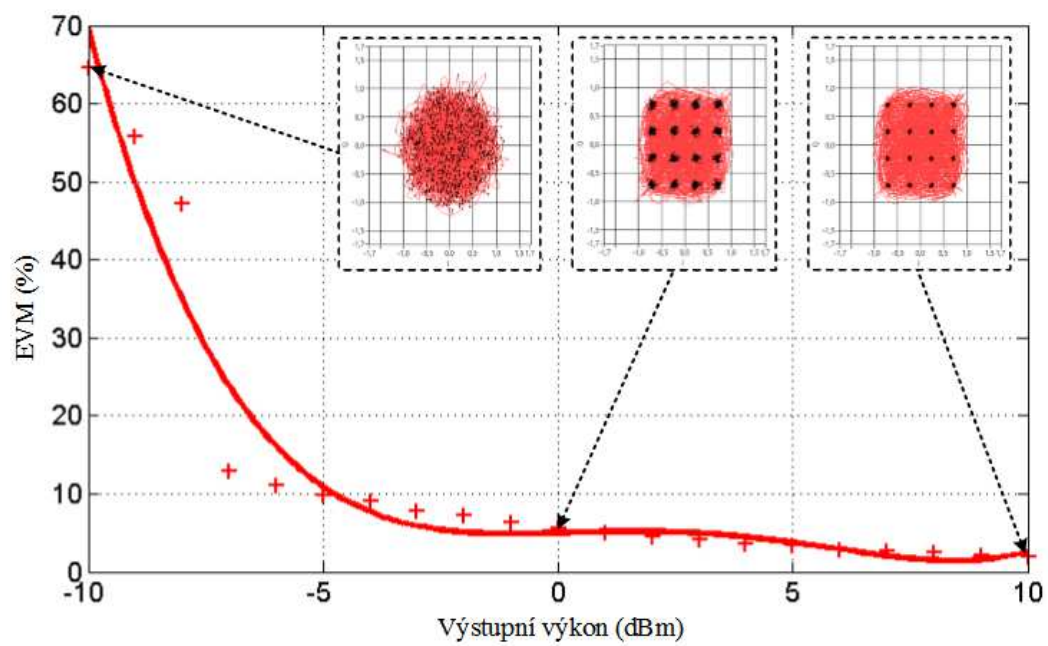
Měření bylo provedeno v laboratoři EB205 na FEI VŠB-TU Ostrava. Pomocí NI-USRP 2921 vektorového síťového analyzátoru jsem analyzoval signál přijatý fotodetektozem Thorlabs PDA10A-EC. Na fotodetektor byla umístěna plankovexní čočka určená k fokusaci svazku optického záření. Fotodetektor se nacházel ve výši stolu ve vzdálenosti 85 cm od země. Vysílací panel byl umístěn na stropě ve vzdálenosti 2,35 m od fotodetektoru. Před vysílač jsem připojil modulátor Bias-T. Na vysílač jsem umístil kolimátor 30°. Nastavil jsem pracovní bod diody 300 mA. Schéma měření pracoviště jsem znázornil na obrázku níže. Pro zlepšení odstupu E_b/N_0 byla umístěna plankovexní čočka před fotodetektor. Na výstup Bias-T byl připojen měřený panel. Na přijímací straně byl použit fotodetektor Thorlabs PDA10A-EC. Fotodetektor byl napájen ze zdroje 12V, 200mA. Přijatý signál byl přiveden přes fotodetektor do NI-USRP 2921 vektorového signálového analyzátoru. Měření jsem provedl v několika bodech. Každou hodnotu jsem měřil desetkrát. Určil jsem střední hodnotu, rozptyl a směrodatnou odchylku. Analyzované hodnoty pochází ze středních hodnot měření. Signál byl generován pomocí NI-USRP 2921 vektorového signálového generátoru s použitou vlnovou délkou 850 nm. Šířka pásma byla nastavena v modulátoru na hodnotě 0,5 MHz. Zisk byl nastaven na hodnotě 12 dB. Nosná frekvence byla 1 MHz. Použil jsem modulační schéma 16-QAM. Pomocí hodnot BER, E_b/N_0 a EVM jsem vyhodnotil a analyzoval kvalitu demodulovaného signálu. Pro měření IR oblasti byla využita 16 stavová modulace QAM. Měření jsem provedl ve vzdálenosti 2,35 m od vysílače. Konstelační diagram modulační techniky 16-QAM je znázorněn na obrázku 8.19 v simulační části měření.



Obr. 7.1: Model komunikačního kanálu



Obr. 7.2: Závislost EVM versus vzdálenost



Obr. 7.3: Závislost EVM versus výstupní výkon

ZÁVĚR

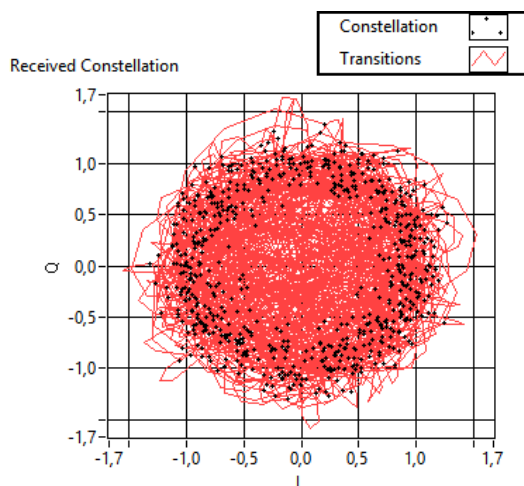
V této práci bylo mým úkolem navrhnout řešení vzestupné komunikace v oblasti RF a IR spektra a otestování pokročilých modulačních technik PSK. Vyhodnocoval jsem parametry BER, E_b/N_0 , EVM a MER a zhodnotil vliv jednotlivých modulačních technik v závislosti na bitové chybovosti BER, odstupu signálu od šumu E_b/N_0 a vzdálenosti. Nejprve bylo nutné připravit modulátor PSK a naimplementovat sadu parametrů pro reálné měření. Modulátor a demodulátor jsem vytvořil v softwaru LabVIEW. Sadu reálných i simulačních měření parametru BER vs E_b/N_0 a BER vs vzdálenost jsem provedl v softwaru LabVIEW. Na základě analýzy vyhodnocených dat jsem došel k závěru, že se vícecestavové modulace obecně hodí pro příjem signálu na kratší vzdálenosti v méně zarušeném prostředí. Vícestavové modulace dokážou přenášet data s větší přenosovou rychlostí, avšak potřebují také větší hodnotu parametru E_b/N_0 užitečného signálu od šumu. Při větších vzdálenostech nám rychleji klesá hodnota E_b/N_0 s využitím vícecestavových modulací 8-DPSK. S modulací 8-DPSK se již při 220 cm od vysílače začínala projevovat bitová chybovost BER. Naproti tomu modulace $\pi/4$ DQPSK dosahovala stejné bitové chybovosti až při vzdálenosti 440 cm. Hodnota parametru E_b/N_0 musela nabývat větších hodnot než 18,5 dB při dodržení standardu bitové chybovosti pro bezdrátové RF komunikace ($BER < 10^{-6}$). Pro modulaci $\pi/4$ DQPSK stačilo použít hodnotu parametru E_b/N_0 14,5 dB.

V praktické části bylo využito reálné i simulační měření k ověření parametrů BER versus SNR a BER versus vzdálenost. Jedním z testovaných parametrů byla bitová chybovost BER. Z naměřených výsledků vyplývá, že bitová chybovost BER je závislá na použité modulaci a také na nastaveném odstupu signálu od šumu E_b/N_0 . Pro vícecestavové modulace je systém náchylnější na odstup E_b/N_0 a proto je nutné jej zvýšit. Nejmenší bitovou chybovost v závislosti na odstupu signálu od šumu nabízela modulační technika $\pi/4$ DQPSK, kdy pro bezchybný datový přenos $BER = 0$ byl potřebný odstup signálu od šumu 14,5 dB. Naopak nejhorší PSK modulace v ohledu bitové chybovosti BER byla modulační technika 8-DPSK, kde bylo potřeba pro bezchybný datový přenos s $BER = 0$ navýšit hodnotu na 18,5 dB odstupu signálu od šumu E_b/N_0 . Dále jsem měřil amplitudu chybového vektoru EVM. Parametr byl testován v závislosti na hodnotě odstupu signálu od šumu a vzdálenosti. S rostoucím odstupem signálu od šumu hodnota EVM klesala. Při vyšších hodnotách EVM docházelo k rozpadu bezdrátového datového spojení. Pro přenos dat byla využita knihovna funkcí Modulation Toolkit pro software LabVIEW. V hardwarové části jsem využil USRP 2921 signálový síťový generátor a USRP 2921 signálový síťový analyzátor. Přenosové vlastnosti v souvislosti BER versus E_b/N_0 a BER versus vzdálenost byly analyzovány s použitou modulační technikou $\pi/4$ DQPSK, 8-DPSK a 16-QAM. Vyslaný signál byl detekován v různých vzdálenostech vysílače od přijímače a byla vyhodnocena sada ověřovacích reálných měření. Z naměřených výsledků můžeme určit, že nejpoužitelnější modulaci pro RF i IR je typu PSK, která při vzdálenosti do 4 metrů nabízí nejlepší parametry E_b/N_0 , BER, EVM a MER.

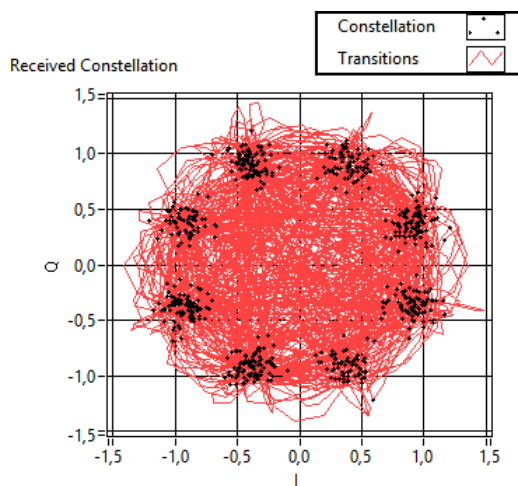
Pro další výzkum bezdrátové datové komunikace v oblasti RF a IR spektra by bylo vhodné navrhnout a aplikovat na systém samoopravné kódy pro zlepšení parametrů odstupu signálu od šumu E_b/N_0 a snížení bitové chybovosti BER. Při reálné aplikaci by takový systém byl schopen bezdrátově datově komunikovat na větší vzdálenosti a nabízel by menší bitovou chybovost BER.

I. SADA OVĚŘOVACÍCH SIMULAČNÍCH MĚŘENÍ

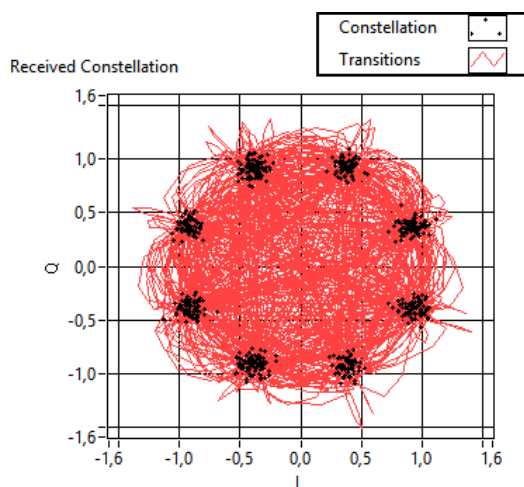
I.I 8-DPSK



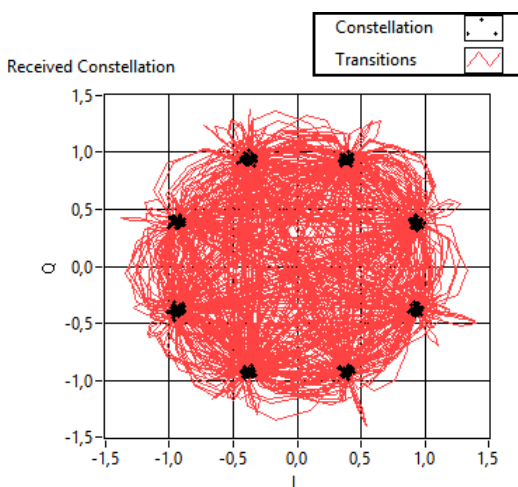
Obr. 8.1: Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 8$ dB



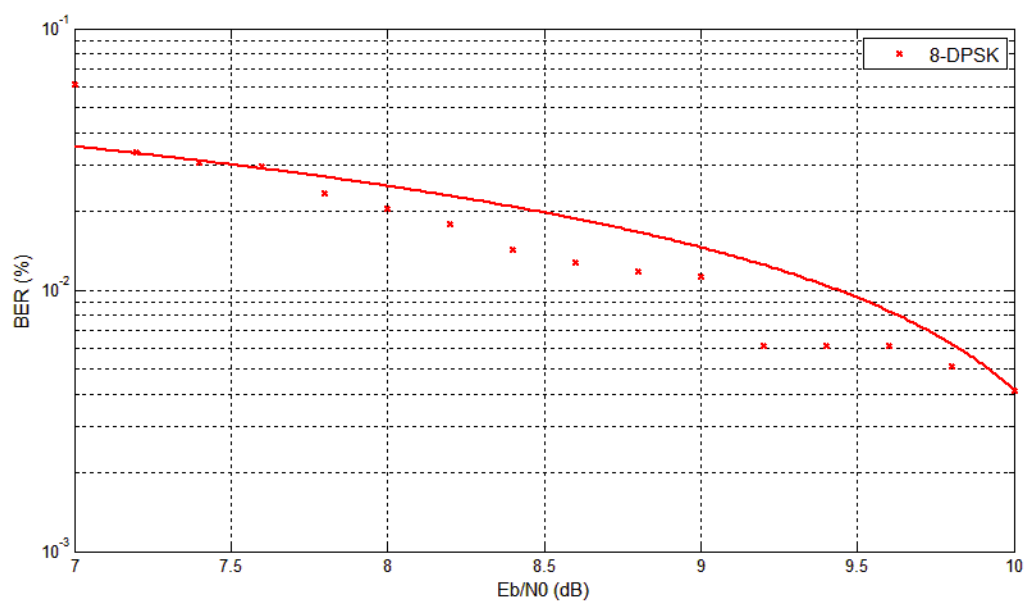
Obr.: 8.2: Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 12$ dB



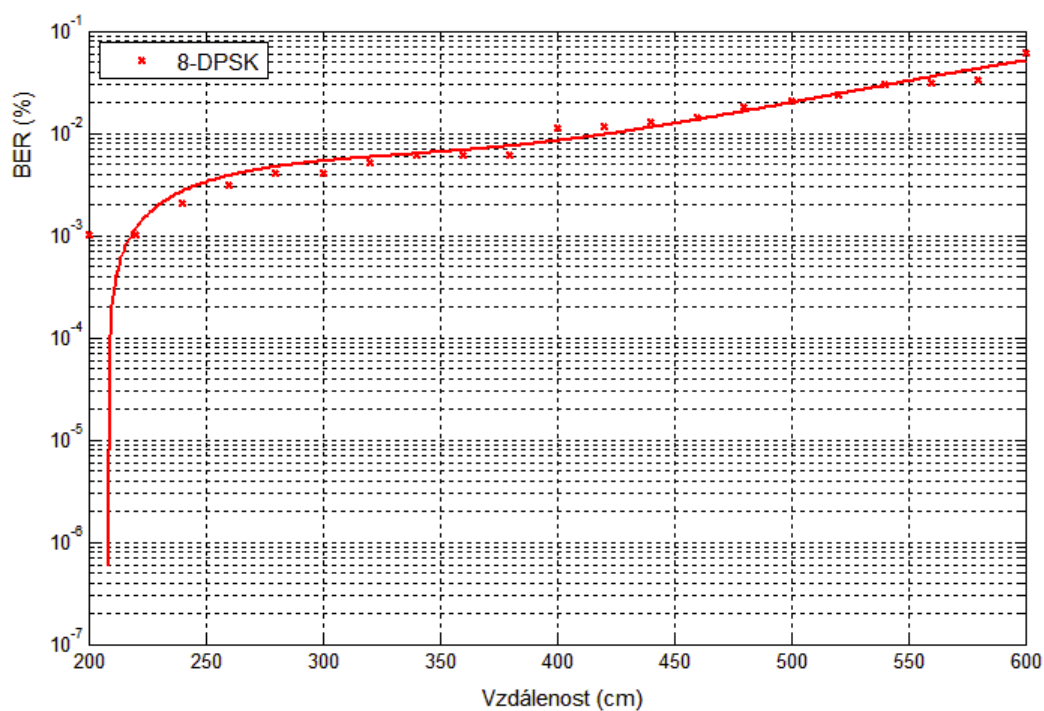
Obr. 8.3: Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 16$ dB



Obr. 8.4: Rx 8-DPSK, $E_b/N_0 = 24$ dB



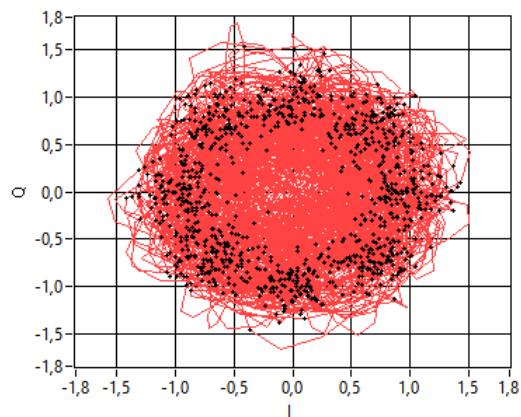
Obr. 8.5: Simulace 8-DPSK - BER versus E_b/N_0



Obr. 8.6: Simulace 8-DPSK - BER versus vzdálenost

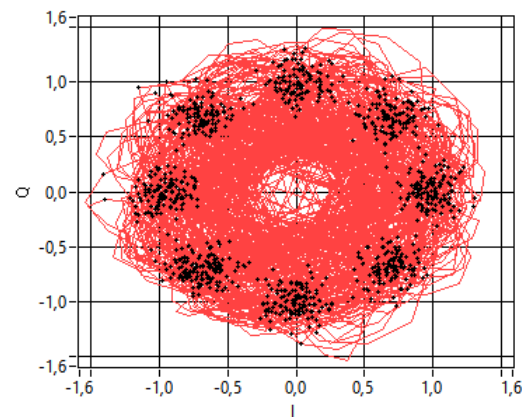
I.II $\pi/4$ DQPSK

RX Constellation Graph



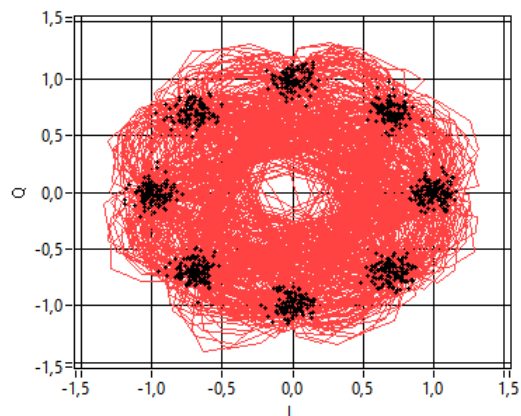
Obr.8.7: Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 8$ dB

RX Constellation Graph



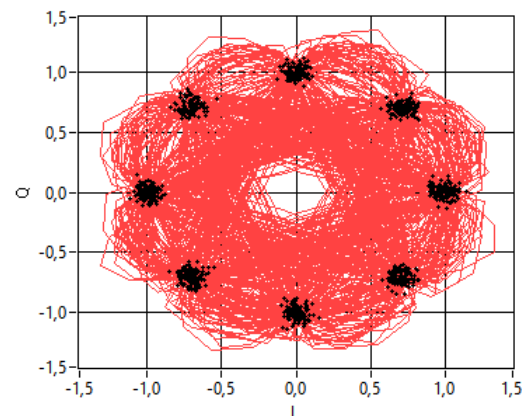
Obr.8.8: Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 12$ dB

RX Constellation Graph

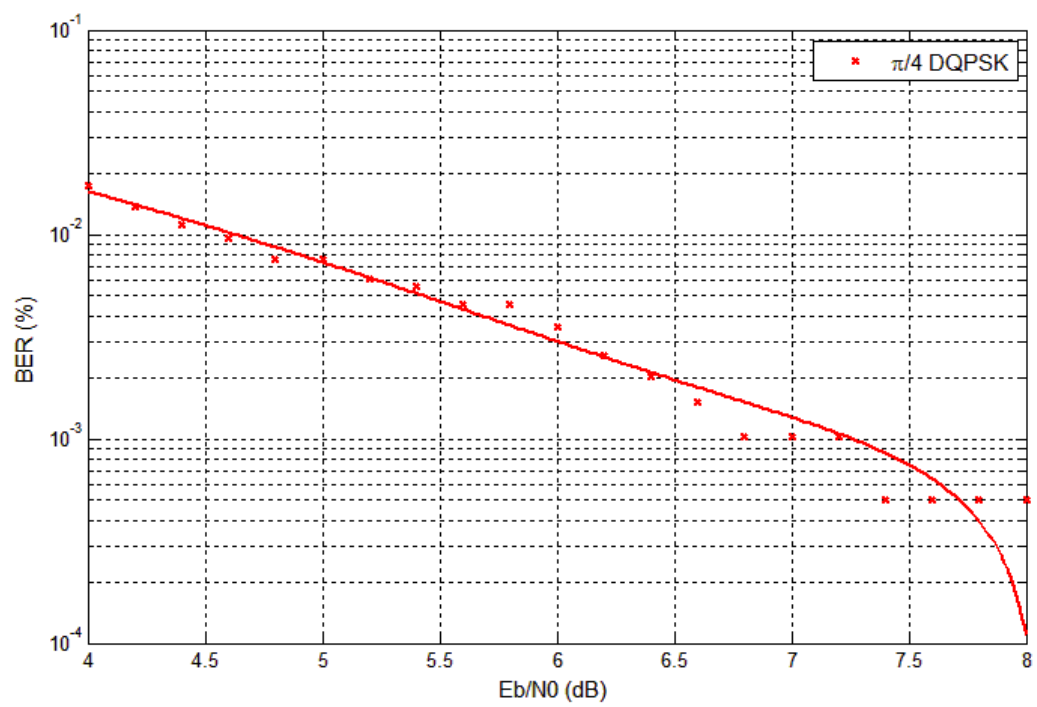
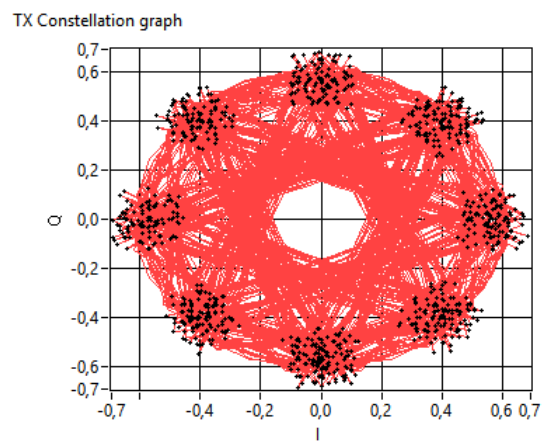
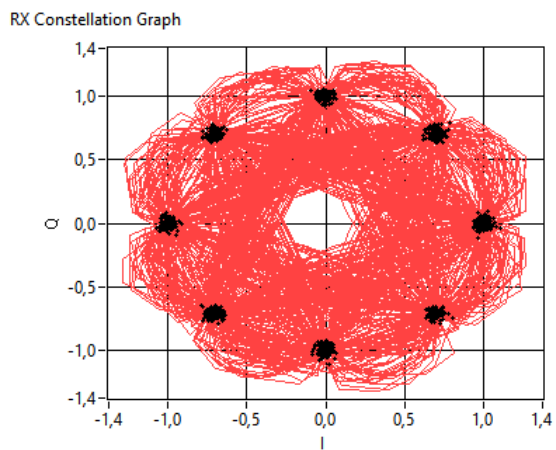


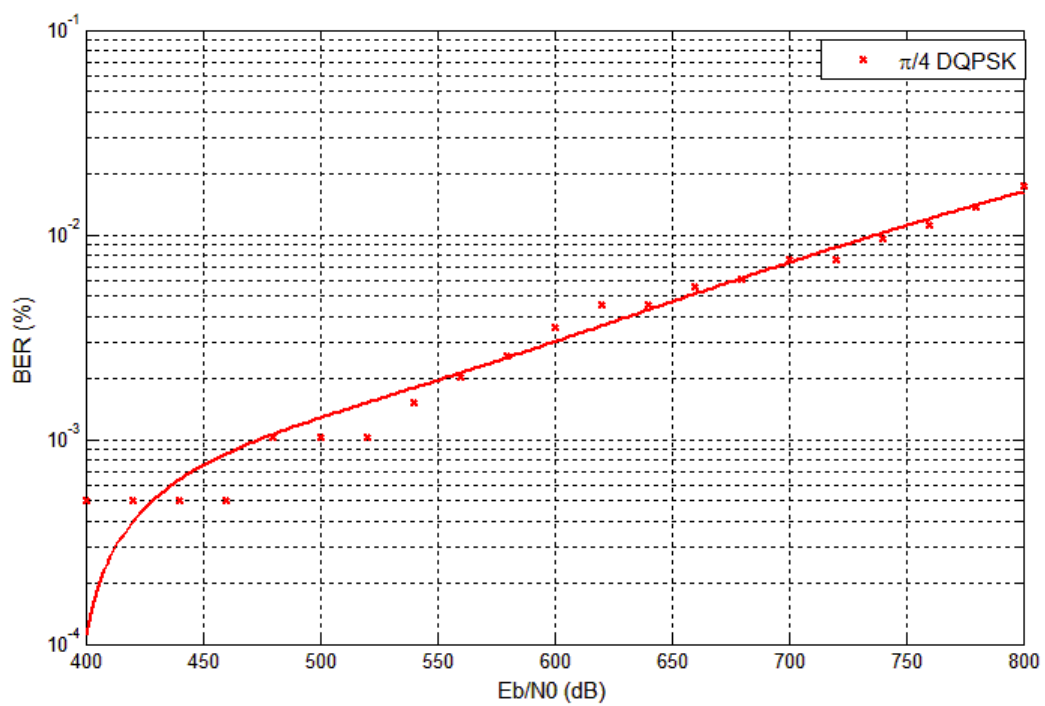
Obr.8.9: Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 16$ dB

RX Constellation Graph



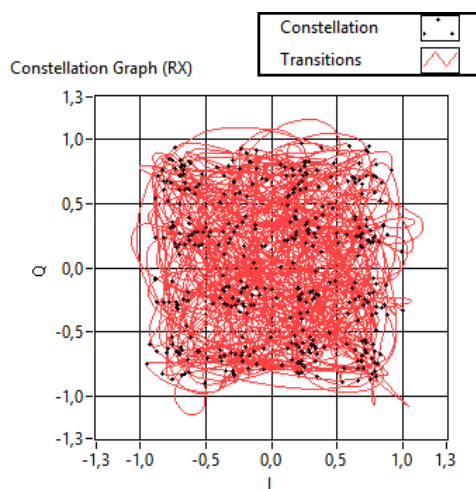
Obr.8.10: Rx $\pi/4$ DQPSK, $E_b/N_0 = 20$ dB



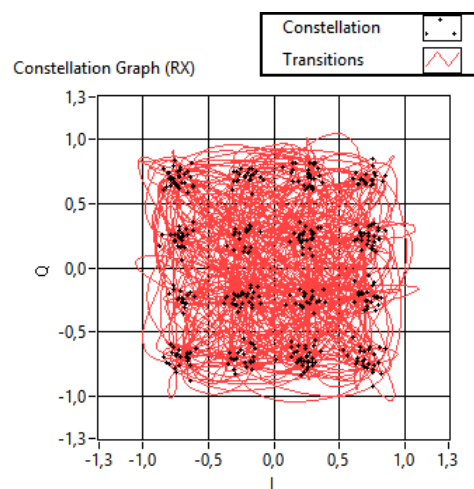


Obr. 8.14: Simulace $\pi/4$ DQPSK - BER versus vzdálenost

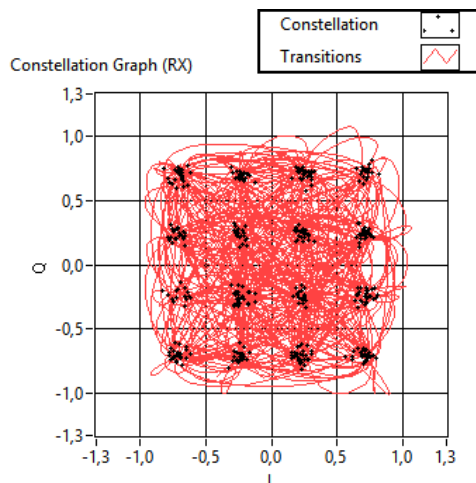
I.III 16-QAM



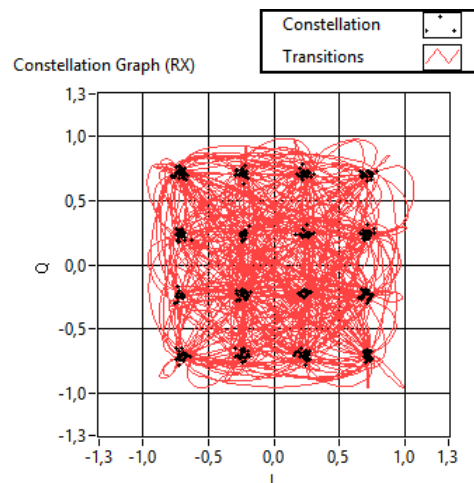
Obr. 8.15: Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 8$ dB



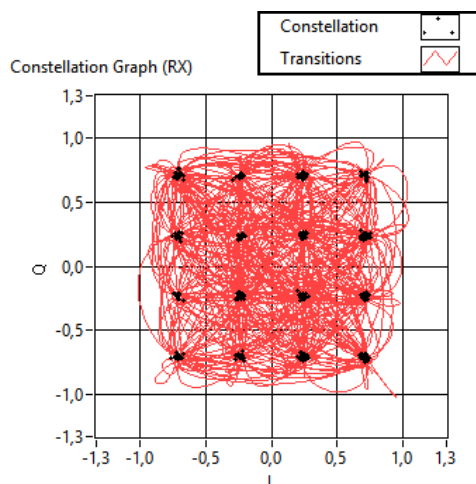
Obr.8.16: Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 12$ dB



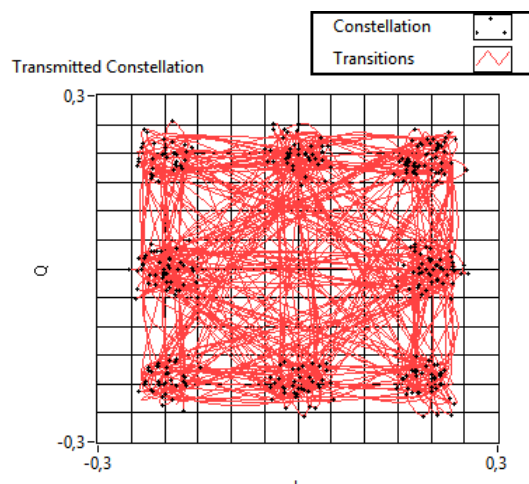
Obr.8.17: Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 16$ dB



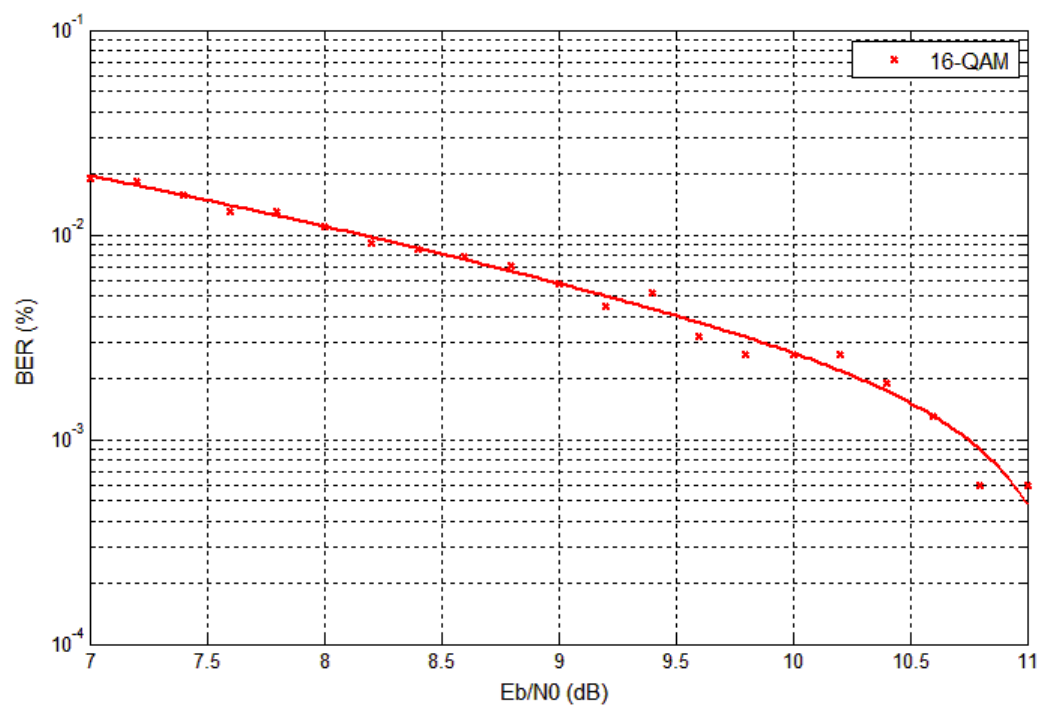
Obr.8.18: Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 20$ dB



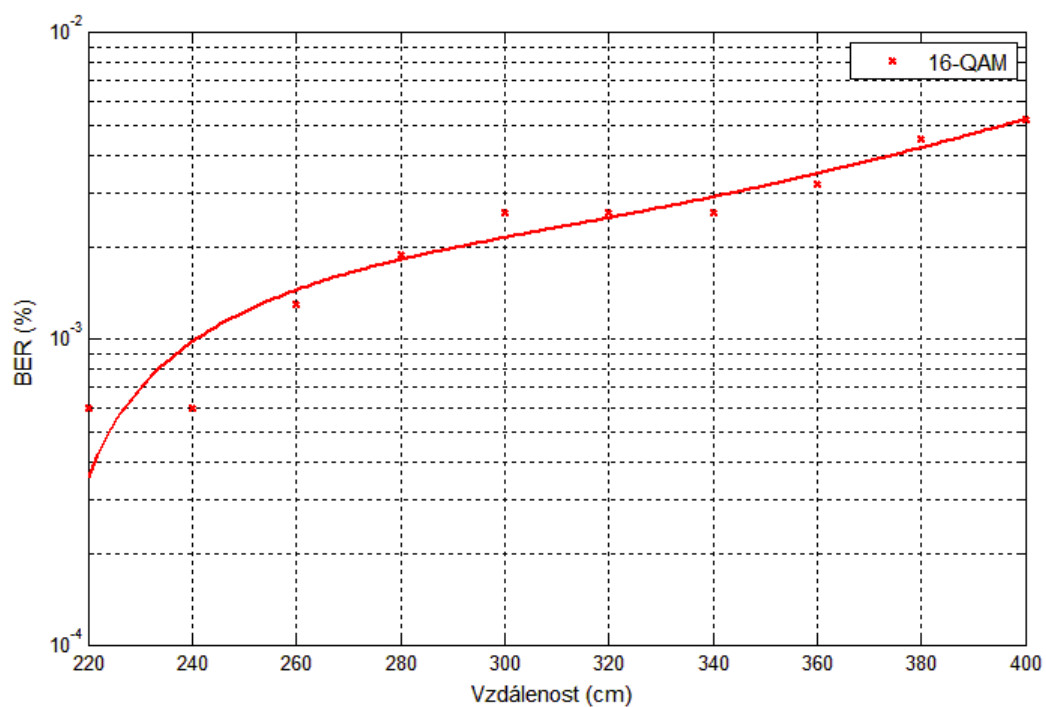
Obr. 8.19: Rx 16-QAM, $E_b/N_0 = 24$ dB



Obr. 8.20: Tx 16-QAM



Obr. 8.21: Simulace 16-QAM - BER versus E_b/N_0



Obr. 8.22: Simulace 16-QAM - BER versus vzdálenost

II. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [2] Z. GHASSEMLOOY, Z.W. Optical wireless communications system and channel modelling with MATLAB. Boca Raton, FL: CRC Press, 2013. ISBN 9781439852354.
- [3] RANDEL, Sebastian, Florian BREYER, Sian C. J. LEE a Joachim W. WALEWSKI.
- [4] Advanced Modulation Schemes for Short-Range Optical Communications. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE. 2010, (16), 1280-1289 [cit. 2016-02-14].
- [5] BINGHAM, John A. C. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come. Communications Magazine, IEEE. 1990, (28), 5-14. DOI: 10.1109/35.54342.
- [6] J. VUCIC, J. KOTTKE, S. NERRETER, A. BUTTNER a J. W. WALEWSKI. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come. Communications Magazine, IEEE. 1990, (28), 5-14. DOI: 10.1109/LPT.2009.2028696.
- [7] BALADA, Radek. Klasifikace typu digitalni modulace. Brno, 2010. Vysoke uceni technicke v Brne. Vedouci prace Karel Povalac.
- [8] BELOHLAVEK, Jiri. Navrh typu modulace pro prostredi s rusenim. Brno, 2009. Vedouci prace Radim Pust.
- [9] MACALIK, Ladislav. Softwarove definovane radio na bazi USRP. Ostrava, 2014. Vedouci prace Jan Zidek.
- [10] eArchiv: Archiv clanku a prednasek Jiriho Peterky [online]. Jiri Peterka, 1996 2016-02-13]. Dostupne z: <http://www.earchiv.cz/a96/a639k150.php3>
- [11] What is BER | Bit Error Rate Tutorial | Radio-Electronics.com [on-line]. [cit. 2016-02-15]. Dostupne z: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/ber/bit-error-rate-tutorial-definition.php>
- [12] Modulacni chyba [online]. 2013, 1-2 [cit. 2016-02-15]. Dostupne z: http://www.Horevaj.com/horevaj/K4_files/K4_89.pdf
- [13] BER and MER Fundamentals [online]. 2007 [cit. 2016-02-15]. Dostupne z: http://www.gcscte.org/presentations/2008/Ron.Hranac_Presentation-BER%20+%20MER%20Fun.pdf
- [14] Understanding Error Vector Magnitude. Electronic design [online]. 2013 [cit. 2016-02-16]. Dostupne z: <http://electronicdesign.com/engineering-essentials/understanding-error-vector-magnitude>
- [15] Modulation Error Ratio (MER) and Error Vector Magnitude (EVM). National Instruments [online]. 2014 [cit. 2016-02-16]. Dostupne z: <http://www.ni.com/white-paper/3652/en/> [16] ARMSTRONG, J. OFDM for Optical Communications. IEEE. 2009, 189-204. DOI: 10.1109/JLT.2008.2010061. ISSN 0733-8724.
- [17] Optical OFDM Basics. SHIEH, William, Qi YANG a Abdullah Al AMIN. Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications. 7. Springer New York, 2011, s. 43-85. ISBN 978-1-4419-8138-7.
- [18] Full rotation-invariant coding and modulation scheme. Roks [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupne z: http://roks.com.ua/ru/Pay_transport/publication8158/
- [19] KOUDELKA, Petr. Studium vlastnosti opticke bezvlaknove datove site pro vnitřní prostory v oblasti viditelného optického záření. Ostrava, 2016.
- [20] DUFFEK, Ludek. MODULATOR QAM. Brno, 2008.

III. SEZNAM PŘÍLOH

- [1] Modulátor PSK v softwaru LabVIEW
- [2] Demodulátor PSK v softwaru LabVIEW
- [3] Modulátor QAM v softwaru LabVIEW
- [4] Demodulátor QAM v softwaru LabVIEW
- [5] Diplomova_Prace.pdf
- [6] Mereni.xlsx
- [7] Zadani.pdf
- [8] Diagramy MS Visio
- [9] Grafy Matlab figure
- [10] Simulace Matlab figure